

**Interaktive verknüpfungsbasierte  
Bauwerksmodellierung  
als Integrationsplattform für den  
Bauwerkslebenszyklus**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur**

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
Dipl.-Inf. Heiko Willenbacher  
geb. am 01. Juli 1969  
in Erfurt

Tag der Disputation: 26. Juni 2002

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Hübler
2. Dipl.Arch. EPFL-SIA Prof. Dr.ès.sc.techn. Niklaus Kohler
3. Prof. Dr.-Ing. Karl Beucke

# Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Prof. Dr. R. Hübler für seine konstruktive Unterstützung sowohl aus fachlicher als auch aus arbeitsorganisatorischer Sicht. Er war jederzeit bereit, sich mit den fachlichen Problemstellungen auseinanderzusetzen und diese zu diskutieren.

Überdies wurde mir während meiner Tätigkeit an dem von ihm geführten Lehrstuhl „Informations- und Wissensverarbeitung“ der notwendige Freiraum zur Anfertigung dieser Arbeit zur Verfügung gestellt.

Weiterhin möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Christian Domrös und Dipl.-Ing. Hans-Dieter Böhlau bedanken. Ihre Mitarbeit im Rahmen verschiedener Tätigkeiten trug wesentlich zur prototypisch technischen Umsetzung der untersuchten Konzepte bei.

Mein Dank gilt außerdem Frau Petzold und Herrn Dr. Frank Petzold, die mir bei der Korrektur des Manuskriptes behilflich waren.

Abschließend möchte ich mich ganz recht herzlich bei meiner Familie bedanken, die mit viel Verständnis meine zeitweilige geistige und körperliche Abwesenheit duldet und mir somit ungestörtes Arbeiten ermöglichte.

Mein ganz besonderer Dank gilt diesbezüglich meiner Frau Dr. Susanne Willenbacher. Sie stand mir überdies jederzeit hilfsbereit und kompetent mit Rat und Tat zur Seite.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>12</b>
1.1	Motivation . . . . .	13
1.2	Zielsetzung . . . . .	17
1.3	Kapitelübersicht . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Grundlagen Ausgangslage</b>	<b>20</b>
2.1	Integration im Bauwesen . . . . .	21
2.1.1	Prozeßcharakter . . . . .	23
2.1.2	Informationsbeschaffenheit . . . . .	25
2.2	Bauwerksmodell als Integrationsebene . . . . .	27
2.2.1	Integrationsgrundlagen . . . . .	30
2.2.2	Verwaltungs- und Austauschaufgabe . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Digitale Bauwerksmodelle</b>	<b>36</b>
3.1	Evolution digitaler Bauwerksmodelle . . . . .	37
3.1.1	Begriffliche Grundlagen . . . . .	38
3.1.2	Spezifikation von Bauwerksmodellen . . . . .	42
3.1.3	Historische Entwicklung von Bauwerksmodellen . . . . .	46
3.1.4	Standardisierungsbemühungen (STEP/IFC) . . . . .	48
3.2	Logische Bauwerksmodellarchitektur . . . . .	52
3.2.1	Partialmodelle und ihre Kohärenz . . . . .	53
3.2.2	Resultierende Bauwerksmodellabbildungen . . . . .	55
3.3	Anforderungen an Bauwerksmodelle . . . . .	59
3.4	Dynamik von Bauwerksmodellen . . . . .	62
3.4.1	Verwaltung dynamischer Modelle . . . . .	65
3.4.2	Modellverwaltungssysteme . . . . .	69
3.5	Zusammenfassung . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Verknüpfungsbasierter Ansatz</b>	<b>73</b>
4.1	Motivation . . . . .	74
4.2	Anforderungen . . . . .	75
4.3	Stand der Forschung . . . . .	77
4.3.1	Integration herstellerspezifischer Modelle . . . . .	77

4.3.2	Integration mittels herstellerunabhängiger Modelle . . . .	79
4.4	Architektur . . . . .	82
4.5	Verknüpfungen . . . . .	84
4.5.1	Strukturelle und semantische Differenzen . . . . .	85
4.5.2	Definition und Spezifikation . . . . .	88
4.5.3	Kategorien . . . . .	91
4.6	Zentrale Komponente . . . . .	93
4.7	Zusammenfassung . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Verknüpfungsmanagement</b>	<b>96</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	96
5.2	Agenten und Multiagentensysteme . . . . .	98
5.2.1	Softwareagenten . . . . .	100
5.2.2	Multiagentensysteme (MAS) . . . . .	103
5.2.3	Agenteninteraktion . . . . .	105
5.2.4	Stand der Forschung . . . . .	110
5.3	Agentenbasiertes Verknüpfungsmanagement . . . . .	110
5.3.1	Agentenbasierte Systemarchitektur . . . . .	110
5.3.2	Verknüpfungserstellung . . . . .	112
5.3.3	Verknüpfungsabarbeitung . . . . .	113
5.3.4	Verknüpfungsspeicherung . . . . .	117
5.3.5	Verknüpfungsexploration . . . . .	119
5.4	Zusammenfassung . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Systemkonzept</b>	<b>122</b>
6.1	Gesamtsystemkonzept . . . . .	122
6.2	Systemkomponenten . . . . .	125
6.2.1	Bauwerksmodellverbund . . . . .	125
6.2.2	Beziehungsgefüge . . . . .	127
6.2.3	Agentenbasierte Systemverwaltung . . . . .	130
6.2.4	Fachplaner und Fachapplikationen . . . . .	132
6.3	Experimentalanwendung . . . . .	133
6.3.1	Datenerfassung - Modellierung . . . . .	133
6.3.2	Verknüpfungsspezifikation und -abarbeitung . . . . .	136
6.4	Zusammenfassung . . . . .	138
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>140</b>
7.1	Bewertung . . . . .	142
7.2	Ausblick . . . . .	143

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Lebenszyklusabschnitte und Planungsphasen eines Bauwerkes . . .	14
1.2	Bauwerksmodell und dessen Ausprägungen . . . . .	16
1.3	IuK-System basierend auf einem digitalen Bauwerksmodell . . . .	17
2.1	Lebenszyklusabschnitte nach Eastman [Eas99] . . . . .	24
2.2	Basis von Kooperation und Kommunikation . . . . .	26
2.3	Prozessuale Sicht basierend auf deskriptivem Modell . . . . .	28
2.4	Integrationsrichtungen nach Bakkeren und Tolman [BT95] . . . .	30
2.5	Applikationsspezifische Datenüberführung . . . . .	31
2.6	Datenüberführung durch neutrales Modell . . . . .	32
2.7	Schnittmengenaustausch . . . . .	32
2.8	Aufgaben des Virtuellen Bauwerks . . . . .	34
3.1	„islands of automation“ entnommen aus: [Bjö95] . . . . .	37
3.2	Ausschnitt eines <i>building product data model</i> . . . . .	40
3.3	Exemplarisches <i>building product model</i> (entspr. Abb. 3.2) . . . .	41
3.4	Beispiele für Abstraktionsmechanismen . . . . .	43
3.5	Zusammenhang: Bauwerksmodell und -daten . . . . .	45
3.6	STEP-Architektur nach Eastman [Eas99] . . . . .	49
3.7	IFC-Architektur nach Eastman [Eas99] . . . . .	51
3.8	Ausschnitt eines Partialmodells TRAGWERK [BFW01] . . . . .	54
3.9	Zentraler Modellansatz . . . . .	55
3.10	Dezentraler Modellansatz . . . . .	57
3.11	Hybrider Modellansatz . . . . .	58
3.12	Beispiele dynamischer Modellmodifikationen . . . . .	63
3.13	Ebenen eines Bauwerksmodells . . . . .	64
3.14	Ausprägungen von Modellierungskonzeptelementen . . . . .	65
3.15	Funktionalitätsspezifikation und -bereitstellung . . . . .	67
4.1	Logisches Bauwerksmodell . . . . .	73
4.2	Differenzierte Modelle physisch identischer Entwurfsobjekte . . .	76
4.3	Herstellerspezifische Fachapplikationsintegration . . . . .	78
4.4	Zentrales herstellerneutrales Bauwerksmodell . . . . .	79
4.5	Integration herstellerunabhängiger Modelle . . . . .	80

4.6	Logische Architektur des verknüpfungsbasierten Ansatzes . . . . .	83
4.7	Mappingprimitive nach [Bij95] . . . . .	85
4.8	Verknüpfungsspezifikation . . . . .	90
4.9	Verknüpfungstyp . . . . .	90
4.10	Ausprägung von Verknüpfungen aus Verknüpfungstypen . . . . .	91
4.11	Beispiel einer informierenden Verknüpfung . . . . .	92
5.1	Verteiltes Gesamtsystem . . . . .	97
5.2	Prinzipielle Arbeitsweise der Agenten . . . . .	100
5.3	Arbeitsweise eines Softwareagenten . . . . .	101
5.4	Koordination der Kommunikation . . . . .	105
5.5	Kommunikationsverfahren zwischen Agenten . . . . .	106
5.6	Schichten der Agentenkommunikation . . . . .	107
5.7	Migrationsvorgang . . . . .	109
5.8	Agentenbasierter Bauwerksmodellverbund . . . . .	111
5.9	Verknüpfungserstellung mit Hilfe von Verknüpfungsagenten . . . . .	113
5.10	Abarbeitung generierender Verknüpfungen . . . . .	114
5.11	Spezifik informierender Verknüpfungen . . . . .	115
5.12	Abarbeitung informierender Verknüpfungen . . . . .	117
5.13	Fallbasierte Verknüpfungstypzuordnung . . . . .	118
5.14	Gesamtdatenbestand extrahiert aus Verknüpfungen . . . . .	120
6.1	Systemkonzeptebenen . . . . .	123
6.2	Gesamtsystemkonzept . . . . .	124
6.3	Modellverwaltungssystemkomponente . . . . .	126
6.4	Einordnung des Link-Clients . . . . .	128
6.5	Systemkonzeptioneller Einsatz der Agenten . . . . .	131
6.6	MVS-Darstellung des Tragwerksmodells . . . . .	134
6.7	Instanziertes Architekturmodell im MVS . . . . .	134
6.8	Zuordnung von JAVA3D Elementen zu Modellklassen . . . . .	135
6.9	Zuordnung von Instanzen zu generierenden Verknüpfungen . . . . .	136
6.10	Quell- und Zielelemente informierender Verknüpfungen . . . . .	137
6.11	Verschiedene Parameter informierender Verknüpfungen . . . . .	137
6.12	Nachrichtenzentrale zur Auswertung der Nachrichten . . . . .	138

# Tabellenverzeichnis

3.1	Funktionalität der Modellverwaltung . . . . .	68
4.1	Bezeichnungen domänenspezifischer und neutraler Modelle . . . .	81
4.2	Strukturelle Verknüpfungen nach Amor [Amo97] . . . . .	86

# Abkürzungsverzeichnis

ACL	Agent Communication Language
AEC	Architecture / Engineering / Construction
AIM	Application Interpreted Model
AKO	Arbeitskreis Objekte
AMS	Agentenmanagementsystem
AP	Application Protocol
API	Application Programming Interface
ARM	Application Reference Model
ATLAS	Architecture, Methodology and Tools for Computer-Integrated Large-Scale Engineering
BREP	Boundary Representation
CAAD	Computer Aided Architectural Design
CABD	Computer Aided Building Design
CAD	Computer Aided Design
CASE	Computer Aided Software Engineering
CIC	Computer Integrated Construction
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CIMsteel	Computer Integrated Manufacturing for Constructional Steelwork
COM	Component Object Model
COMBI	Computer-Integrated Object-Oriented Product Modelling Framework for the Building Industry
COMBINE	Computer models for the Building Industry in Europe
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CSCW	Computer Supported Cooperative Work
CSG	Constructive Solid Geometry
DAI	Distributed Artificial Intelligence
DCOM	Distributed Component Object Model



DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DSTV	Deutscher Stahlbauverband
DXF	Data Interchange Format
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
GARM	General AEC Reference Model
IAI	International Alliance for Interoperability
IBDE	Integrated Building Design Environment
IDEF1x	Integration Definition for Information Modeling
IDL	Interface Definition Language
IDM	Integrated Data Model
IFC	Industry Foundation Classes
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
JADE	Java Agent Development Framework
KI	Künstliche Intelligenz
KIF	Knowledge Interchange Format
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
LAN	Local Area Network
MAS	Multiagentensystem
MIKO	Management- und Informationssystem für den Komplettbau
MVS	Modellverwaltungssystem
NIAM	Nijssen's Information Analysis Method
OMG	Object Management Group
O.P.E.N.	Objectoriented Product model Engineering Network
PDT	Product Data Technology
PDES	Product Data Exchange Standard
PROLOG	Programming in Logic
SDAI	Standard Data Access Interface
SFB	Sonderforschungsbereich
SPF	STEP (Part 21) Physical File
STEP	Standard for the Exchange of Product data Model ISO-10303
TOCEE	Towards a Concurrent Engineering Environment in the Building and Engineering Structures Industry
UML	Unified Modelling Language
UoD	Universe of Discourse

VEGA	Virtual Enterprise using Groupware tools and distributed Architectures
VKI	Verteilte Künstliche Intelligenz
VML	View Mapping Language
W3C	World Wide Web Consortium
WAN	Wide Area Network
XML	Extensible Markup Language
XSLT	Extensible Stylesheet Language Transformations
ZVM	Zentrales Verknüpfungsmanagement

# Zusammenfassung

Den Gegenstand dieser Arbeit bilden die Konzeption und die exemplarische Realisierung eines verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierungsansatzes zur Schaffung einer integrierenden Arbeits- und Planungsumgebung für den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken.

Ausgehend von der Auffassung, daß die Vielzahl der verschiedenen in den Bauwerkslebenszyklus involvierten Prozesse, deren Informationsanforderungen und mithin ein entsprechendes Prozeßmanagement nicht a priori determiniert werden können, wird im vorliegenden Ansatz ein deklarativ ausgerichteter Bauwerksmodellverbund als Basis der Integrationsumgebung vorgeschlagen.

Es wird konstatiert, daß die lebenszyklusumfassende Kooperation und Kommunikation der beteiligten Akteure und Fachapplikationen in einem derart heterogenen Umfeld nur durch eine adäquate Verständigung zwischen abstrahierten, domänenspezifischen und auf dem gleichen Modellierungsparadigma beruhenden Partialmodellen sinnvoll realisierbar ist. Das objektorientierte Modellierungsparadigma erweist sich, auf Grund der zur Verfügung stehenden Abstraktionsmechanismen und der Affinität zwischen den Modellierungselementen und den realen Entwurfsobjekten, belegbar als das diesbezüglich am besten geeignete.

Auf Grund der de facto existierenden prozeß- und informationsbezogenen Dynamik im Bauwerkslebenszyklus werden sowohl der Bauwerksmodellverbund in seiner Konstitution aus verschiedenen Partialmodellen als auch die einzelnen Partialmodelle dynamisch modifizierbar konzipiert und auf Basis spezieller Modellverwaltungssysteme technisch realisiert.

Die Verständigung innerhalb der vorgeschlagenen Gesamtbauwerksmodellarchitektur basiert auf anwenderspezifisch zu erstellenden Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen und wird im Sinne einer hybriden Modellarchitektur durch eine zentrale, die Verknüpfungen verwaltende Komponente koordiniert.

Es wird gezeigt, daß dieser verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierungsansatz die notwendige Funktionalität und vor allem Flexibilität bietet, um den aus der Berücksichtigung der Dynamik resultierenden Anforderungen hinsichtlich eines

effizienten, umfassenden Daten- und Informationsaustausches zwischen den Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus gerecht zu werden.

Zur Verwaltung und Abarbeitung der Verknüpfungen und somit zur Realisierung des Bauwerksmodellverbundes wird der Einsatz von Softwareagenten vorgeschlagen und entsprechend diskutiert. Die Softwareagenten eignen sich wegen ihrer spezifischen Eigenschaften wie Autonomie, Reaktionsfähigkeit, Proaktivität, soziales und intelligentes Verhalten zur Unterstützung der kooperativ zu koordinierenden Kommunikation innerhalb des Bauwerksmodellverbundes.

Die diskutierten Ansätze werden prototypisch in Form eines interaktiven verknüpfungsbasierten Modellierungssystems und einer Verknüpfungsverwaltung basierend auf einem Multiagentensystem realisiert und bewertet.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich thematisch und organisatorisch in die Forschungstätigkeit des Sonderforschungsbereiches 524 „*Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken*“ ein.

Dabei bilden die entwickelten Konzepte und vorgestellten prototypischen Realisierungen einen Schwerpunkt des Teilprojektes D3 „*Digitales Bauwerksmodell als Grundlage der Datenintegration für Bestandsinformationen*“.

# Kapitel 1

## Einleitung

Der Lebenszyklus eines Bauwerkes ist durch verschiedene Phasen und Abschnitte und eine Vielzahl involvierter Beteiligter charakterisiert. Besonders in den planerischen und gestalterischen Stadien (Vorentwurf, Umnutzung, Revitalisierung) werden die beteiligten Fachplaner während der Erledigung der ihnen übertragenen Aufgaben mit unterschiedlichsten Problemen konfrontiert, bei deren Bewältigung sie differenzierte Entscheidungen treffen müssen. Grundlage dieser Entscheidungen bilden zum großen Teil bereits vorhandene Daten und Informationen, welche in vorhergehenden Abschnitten des Bearbeitungsprozesses erstellt wurden.

Die Bereitstellung und Untersuchung geeigneter Methoden und Verfahren bildet den strategischen Rahmen dieser Arbeit.

UNTER-  
STÜTZUNG  
PLANERISCHER  
ENTSCHEIDUN-  
GEN

Konkretes Anliegen ist dabei die Erforschung und Evaluierung von Möglichkeiten zur Realisierung einer computergestützten Datenintegrationsebene als Basis eines Informations- und Kommunikationssystems (IuK-System), welches durch die rechnerverarbeitbare adäquate Bereitstellung aller relevanten Daten und Informationen einen entscheidenden Beitrag zur Unterstützung dieses Entscheidungsfindungsprozesses leistet.

IUK-SYSTEM  
ZUR  
INTEGRATION  
DER  
BETEILIGTEN

Innerhalb der Arbeit werden in diesem Kontext die Grundlagen und Anforderungen eines so aufgefaßten IuK-Systems - speziell die Komponenten effiziente Datenverwaltung und verlustfreier effektiver Daten- und Informationsaustausch auf der Basis eines digitalen Bauwerksmodells - diskutiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur praktischen Anwendbarkeit der aufgestellten Konzepte, welche anhand ausgewählter (exemplarisch implementierter) Problemstellungen experimentiert wurden, werden dargelegt.

Den Beitrag zur Lösung der Probleme bei der Schaffung einer integrierenden computergestützten Planungsumgebung bildet die Konzeption eines interaktiven Bauwerksmodells als Basis des Informationszugriffs bzw. -austausches, welches

INTERAKTIVES  
BAUWERKSMO-  
DELL

mit Hilfe agentenbasierter Technologien praktisch realisiert wird. Dieses interaktive Bauwerksmodell konstituiert sich aus spezifischen sichtenbezogenen Teilmodellen und diversen zu definierenden Verknüpfungen zwischen diesen. Interaktivität des Bauwerksmodells bezieht sich dabei zum einen auf die Interaktion der Fachplaner mit dem Bauwerksmodell und zum anderen auf die verknüpfungsorientierte Interaktion der Teilmodelle untereinander.

## 1.1 Motivation

Die Arbeits- und Organisationsformen im Bauwesen, speziell in der Bauplanung, unterliegen seit einigen Jahren gravierenden Veränderungen. Die zunehmende Komplexität der Projekte, der ständig wachsende Bedarf an detailliertem Sachverständnis (Planungswissen) innerhalb der beteiligten Disziplinen und nicht zuletzt die weltweite Öffnung der Märkte führen zu einer extremen Spezialisierung und daraus resultierender Arbeitsteilung innerhalb der Bauprozesse im Lebenszyklus eines Bauwerkes. Diese Tendenz kann anhand verschiedener Publikationen aus Wissenschaft und Wirtschaft belegt werden [FFH<sup>+</sup>94] [KK97] [JL98]. Obermeyer urteilte bereits 1997 [Obe97]:

GRAVIERENDE  
VERÄNDERUN-  
GEN IM  
BAUWESEN

*Planen ist arbeitsteilig geworden, im Gegensatz zu früher, wo Einzelwissen im wesentlichen für das Planen ausgereicht hat. Heute kann das vermehrte Wissen nur von einer Vielzahl an Fachplanern eingebracht werden.*

Steiger et al. konstatieren in diesem Zusammenhang [SDSZ97]:

*Das Bauwesen und damit auch die Consultingwirtschaft unterliegen derzeit einem tiefgreifenden Strukturwandel. Die Projekte werden komplexer, ... Koordinierungsleistungen sind von den Planern in bisher nicht gekanntem Umfang zu erbringen ... Von zentraler Bedeutung ist dabei ... die Kommunikation innerhalb des Unternehmens und in den Projekten optimal zu gestalten. Eine reibungslose Kommunikation, deren Hauptaufgabe es ist, jede Art von Informationen zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, den richtigen Personen - just in time - zur Verfügung zu stellen, ist eine unabdingbare Voraussetzung für den Projekt- und für den Unternehmenserfolg.*

Ausgehend von dieser Tendenz zunehmender sowohl personeller als auch räumlicher und zeitlicher Arbeitsteilung läßt sich die folgende Problematik charakterisieren:

RÄUMLICH UND  
ZEITLICH  
GETRENNTE  
KOOPERATION  
HOCHSPEZIALISIERTE  
FACHPLANER

Der Lebenszyklus eines Bauwerkes unterteilt sich beginnend bei der Projektierung und Planung eines Bauvorhabens über die Nutzung, mögliche Umnutzungen und Revitalisierungen bis hin zum Rückbau des Bauwerkes in verschiedene Bearbeitungsphasen [TF94] (s. auch Abschnitt 2.1.1).



Abbildung 1.1: Lebenszyklusabschnitte und Planungsphasen eines Bauwerkes

Speziell innerhalb der Abschnitte (s. Abbildung 1.1), welche eher planungsorientierte Tätigkeiten umfassen (wie z.B. Bedarfsermittlung, CAD/Visualisierung, Statik, Kostenrechnung oder Facility Management), nehmen verschiedene Fachplaner unterschiedliche Rollen ein (z.B. Architekt, Tragwerksplaner, Fachingenieure TGA/HSE, ...), um diverse Aufgaben zu erfüllen. Zur Erledigung der abschnitts- und rollenspezifischen Aufgaben sind in der Regel Planungsinformationen zeitlich vorgelagerter sowie paralleler Prozesse und Abschnitte notwendig. Deshalb muß der Fachplaner effizient mit anderen Planungsbeteiligten kommunizieren und mit ihnen kooperieren, um somit deren Ergebnisse zur Unterstützung seiner eigenen Entscheidungsfindung verwenden bzw. seine Entscheidungen direkt weiterleiten zu können. Durch den überwiegend phasenweise isolierten Einsatz hochspezialisierter computergestützter Datenverarbeitungssysteme (CAD, CAE, FEM-Analyse, etc.) liegen die benötigten Planungsinformationen partiell bereits in rechnerinterner Repräsentation vor. Eine wünschenswerte effizienz- und effektivitätssteigernde über alle Bearbeitungsphasen durchgängig computergestützte Bearbeitung und Weiterverarbeitung der rechnerintern vorliegenden Daten ist jedoch bisher problematisch und in verschiedenen Bearbeitungsabschnitten nach wie vor unmöglich.

Trotz erheblicher Anstrengungen in bisherigen und aktuellen Forschungsprojekten (s. Abschnitte 3.1.3 und 3.4.2) werden die kooperativen und kommunikativen Aspekte innerhalb integrativer Bauwerks-Lebenszyklusbetrachtungen bisher konzeptionell und daraus resultierend auch praktisch nur unzureichend unterstützt.

In diesem Zusammenhang ergibt sich eine erste essentielle Fragestellung, welche prinzipiell mit zwei Perspektiven verbunden werden kann: Was bildet den integrierenden Faktor innerhalb einer durchgängig computergestützten Planungsumgebung?

**Forderung:**  
DURCHGÄNGIG  
COMPUTER-  
GESTÜTZTE  
DATEN- UND  
INFORMATIONSPRÄSENZ

**Prozessuale Sicht:** Bildet ein PROZESSMODELL des Planungsvorganges, welches die Beiträge der Beteiligten und ihrer spezifischen Daten und Applikationen determiniert, die Basis der Integration

**Deskriptive Sicht:** oder dient eine rechnerinterne modellhafte Abbildung des Planungsgegenstandes - ein BAUWERKSMODELL - als zentraler Ver- und Bearbeitungsgegenstand, damit als handlungskordinierende Integrationsplattform, welche allen Beteiligten den Zugriff auf abgestimmte Bauwerkszustandsbeschreibungen ermöglicht?

Überlegungen und Diskussionen basierend auf jeweils einer der beiden Sichtweisen ziehen eine große Anzahl weiterer offener Fragen nach sich. Aus prozeßorientierter Sicht resultieren folgende:

- Gibt es ein allgemeingültiges Prozeßmodell für das Bauwesen?
  - Was gibt es für Prozesse im Bauwesen?
  - Wie können diese formalisiert und beschrieben werden?
  - Wie sind die Korrelationen zwischen den Prozessen und Teilprozessen?
  - Wie sieht ein derartiges Prozeßmodell aus?
- Wie lassen sich über die Prozesse die Beteiligten und deren Applikationen einbinden?
- Wie funktioniert der Daten- und Informationsaustausch zwischen den Prozessen?

Ähnliche Fragen lassen sich auch bei deskriptiven Betrachtungen formulieren:

- Gibt es ein allgemeingültiges Bauwerksmodell?
  - Wie sieht ein Bauwerksmodell aus, wie ist es strukturiert?
  - Wie lassen sich die Elemente für ein Bauwerksmodell identifizieren, formalisieren und als globales gemeinsames Bauwerksmodell beschreiben?
- Wie erfolgt der schreibende und lesende Zugriff der Beteiligten und deren Fachapplikationen auf das Bauwerksmodell?
- Wie werden die Daten innerhalb des Bauwerksmodells verwaltet?

Für beide Sichtweisen gilt, daß es bisher nur ansatzweise und nur für eng begrenzte Ausschnitte gelungen ist, auf die eine oder andere Weise eine computergestützte Integration der Beteiligten und ihrer Fachapplikationen zu realisieren.

Grundsätzlich ist es dabei unmöglich, die Sichtweisen komplett getrennt voneinander zu betrachten [ACDB<sup>+</sup>98]. Gerade aus der Auseinandersetzung mit der



Dialektik der beiden Ansichten wird letztlich ein Gesamtkonzept zur Schaffung einer integrativen Planungsumgebung entstehen.

Innerhalb der Arbeit wird der deskriptive Ansatz - also die Integration der Beteiligten mittels eines digitalen Bauwerksmodells - präferiert und dient somit als grundlegende These für die hier durchgeführten Untersuchungen zur Schaffung einer integrierenden Planungsumgebung für Bauwerke. Begründungen zu dieser Entscheidung werden später (s. Abschnitt 2.2) detailliert dargelegt.

Der deskriptiven Sichtweise folgend wird die Integration der Beteiligten, d.h. deren zielgerichtete Kooperation und Kommunikation, über ein digitales Bauwerksmodell realisiert. Dies bedeutet, daß sich der Daten- und Informationsaustausch über die Strukturen und Inhalte (s. Abbildung 1.2) des digitalen Bauwerksmodells vollzieht.

**Annahme 1:**  
DESKRIPTIVER  
ANSATZ -  
DIGITALES BAU-  
WERKSMODELL  
IST INTEGRIE-  
RENDER  
FAKTOR

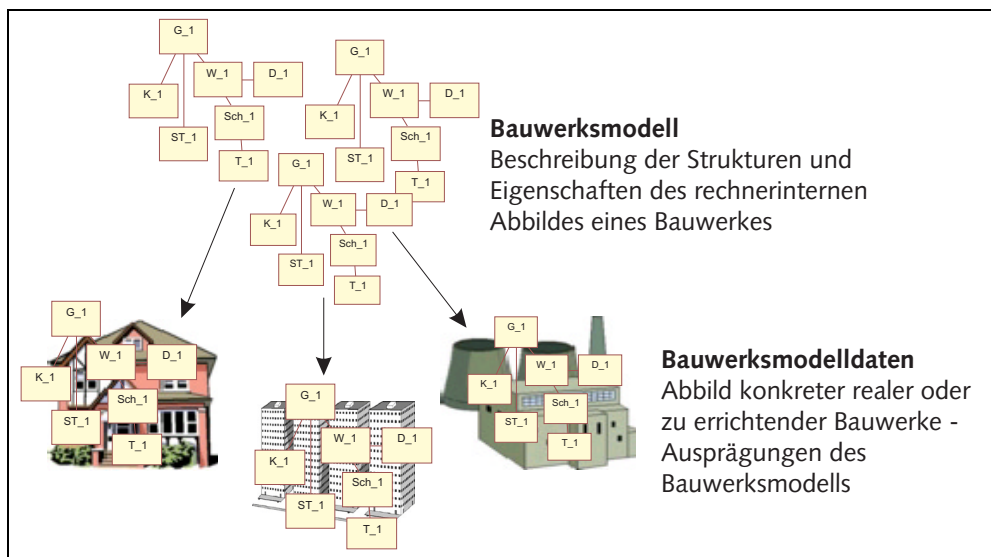


Abbildung 1.2: Bauwerksmodell und dessen Ausprägungen

Dies setzt zum einen dessen Verfügbarkeit und zum anderen ein allgemeines Verständnis über die verwendeten Modellstrukturen und -inhalte bzw. die Fähigkeit der Beteiligten diese interpretieren zu können, voraus. Jedoch kann aus Gründen der Komplexität und Dynamik weder von der Verfügbarkeit eines globalen, den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes abdeckenden Bauwerksmodells, noch von dessen allgemeiner Interpretierbarkeit ausgegangen werden.

Daraus folgt eine weitere fundamentale These dieser Arbeit, welche beinhaltet, daß es unmöglich ist, ein allgemeines, für alle Teilprozesse geeignetes und auf lange Sicht Gültigkeit besitzendes Bauwerksmodell für beliebige Bauwerkstypen und Bauweisen für den gesamten Bauwerkslebenszyklus a priori zu definieren.

Aus dieser Annahme leiten sich erstens die Notwendigkeit der Modellzerlegung in spezifische Partial- oder Domänenmodelle und zweitens der Einsatz von Ver-

**Annahme 2:**  
ALLGEMEIN-  
GÜLTIGES,  
UMFASSENDES  
BAUWERKSMO-  
DELLE NICHT  
DEFINIERBAR

fahren und Methoden zur laufzeitdynamischen Adaption und Modifikation des Bauwerksmodells und daraus resultierend der Bauwerksmodelldaten ab.

Nur dadurch ist es möglich, auf die de facto existierende modell- und prozeßbezogene Dynamik innerhalb eines Bauvorhabens reagieren zu können. Diese Ansätze sind Bestandteil verschiedener Forschungsarbeiten [WK95][Kow97][BJS98][Ste97] (s. Abschnitt 3.4.2), in ihrer Konsequenz für die Integration aller Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus jedoch noch nicht ausreichend untersucht und zu konzeptueller Tragfähigkeit oder gar praktischer Realisierbarkeit gereift.

## 1.2 Zielsetzung

Das strategische Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Schaffung eines durchgängig computergestützten Informations- und Kommunikationssystems zu leisten. Im Rahmen des Lebenszyklusses eines Bauwerkes werden hier speziell die planerisch gestalterischen Bearbeitungsphasen (Entwurf, Tragwerksplanung, Konstruktion,...) betrachtet, da diese Phasen über das umfangreichste zu unterstützende Kooperations- und Kommunikationspotential zwischen den dort involvierten Fachplanern und Fachapplikationen verfügen und sich die Resultate dieser Untersuchungen auf die übrigen Phasen und Abschnitte übertragen lassen.

Der o.a. ersten abgrenzenden Annahme folgend ist zentrales Anliegen bei der Schaffung eines solchen IuK-Systems die Etablierung einer Integrationsplattform zur Unterstützung des Daten- und Informationsaustausches zwischen den Fachplanern bzw. ihren Applikationen, mit deren Hilfe durch Effektivitätssteigerung und Fehlerverminderung eine Kosten- und Zeitersparnis im Bauwesen allgemein und speziell in der Bauplanung erzielt werden kann. Die Basis der hier zu konzi-

BEITRAG ZUR  
SCHAFFUNG  
EINES  
IUK-SYSTEMS

UNTERSTÜTZUNG  
DER  
KOOPERATION  
UND KOMMUNI-  
KATION

BASIEREND AUF  
BAUWERKSMO-  
DELLORIEN-  
TIERTER  
INTEGRATIONS-  
PLATTFORM

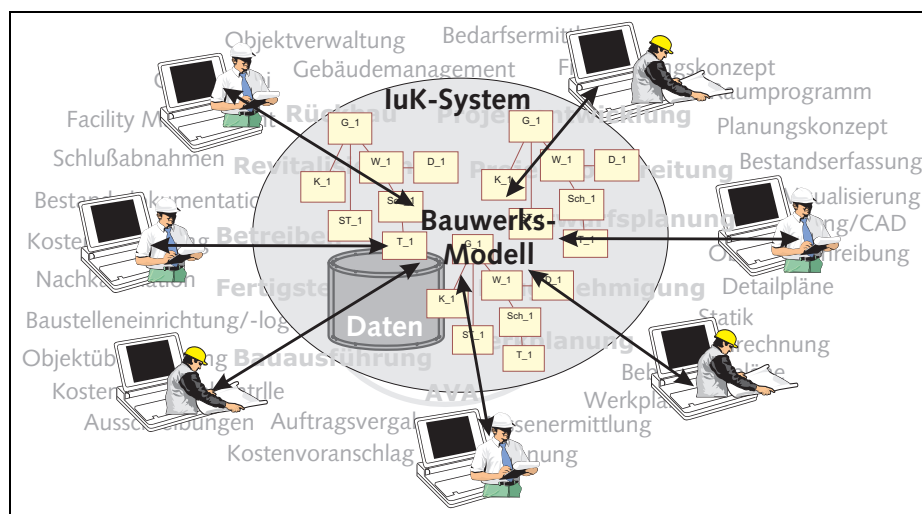


Abbildung 1.3: IuK-System basierend auf einem digitalen Bauwerksmodell

pierenden Integrationsplattform bildet ein digitales interaktives (dynamisch modifizierbares) Bauwerksmodells (s. Abbildung 1.3).

Aus der zweiten o.a. Annahme folgt die Fokussierung der Arbeit auf die Konzeption und Realisierung der informationstechnischen Grundlagen eines aus verknüpften Teilmodellen bestehenden digitalen Bauwerksmodells.

Zu den Zielen der Untersuchungen gehören demnach in erster Linie die Diskussion geeigneter Strukturierungen für Teilmodelldaten und deren Modellbeschreibungen sowie die Entwicklung entsprechend notwendiger Modellverwaltungsmechanismen.

Weiterhin ist basierend auf einer Analyse der Strukturierungen der Teilmodelle deren Synthese, getragen durch die Definition und Kategorisierung von Verknüpfungen und Verknüpfungstypen zwischen den Teilmodellen, zu konzeptionieren.

Aufbauend auf diesem Entwurf werden im Rahmen der Realisierung der Integrationsplattform und mithin des Daten- und Informationsaustausches beruhend auf den Verknüpfungen zwischen den Teilmodellen agentenbasierte Technologien diskutiert und erprobt. Im Vordergrund der prototypischen Entwicklung stehen insbesondere die effiziente Verwaltung der Teilmodelle und deren Daten sowie die Verwaltung und Abarbeitung der sowohl datenmanipulierenden als auch notificationsbezogenen Verknüpfungen.

Mit der Realisierung des Prototyps als Multiagentensystem ist die Erwartung verbunden, das Potential eines derartig aufgefaßten digitalen interaktiven Bauwerksmodells und die Möglichkeiten der effizienten Kommunikation und Kooperation der Beteiligten im Lebenszyklus eines Bauwerkes aufzuzeigen.

AGENTEN  
VERWALTEN  
DEN AUS  
VERKNÜPFTEN  
TEILMODELLEN  
BESTEHENDEN  
BAUWERKSMO-  
DELLEVERBUND

## 1.3 Kapitelübersicht

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 7 prinzipiell aufeinander aufbauende Kapitel, deren Inhalt im folgenden grob dargestellt wird.

**Kapitel 2** führt in allgemeine theoretische Grundlagen integrativer Betrachtungen im Bauwerkslebenszyklus ein. Dabei steht zunächst die Wahl der Perspektive - prozessuale oder deskriptive Sicht - im Vordergrund. Anschließend werden allgemeine Aussagen zur Integration mittels digitaler Bauwerksmodelle erörtert und ein diesbezüglicher aktueller Stand der Forschung reflektiert.

**Kapitel 3** befaßt sich detailliert mit der Theorie objektorientierter digitaler Bauwerksmodelle. Dabei wird ein Überblick über verschiedene Realisierungsansätze digitaler Bauwerksmodelle gegeben, deren Zerlegung in kohärente domänenspezifische Teilmodelle diskutiert und die Diskrepanz zwischen Modelldefinition und Schnittstellendefinition aufgezeigt. Die theoretische

Auseinandersetzung mit der Dynamik im Bauwerkslebenszyklus bildet den zweiten Schwerpunkt dieses Kapitels. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Abbildung der Dynamik und die Konsequenzen für die Verwaltung eines derartig *dynamischen* Bauwerksmodells.

**Kapitel 4** dient der Beschreibung der grundlegenden Konzepte des in den Forschungsarbeiten entwickelten und im Rahmen dieser Arbeit vorzustellenden interaktiven Bauwerksmodellansatzes. Ausführlich werden sowohl die Gesamtarchitektur des Ansatzes als auch die einzelnen Komponenten (*Verknüpfungstypen*, *Verknüpfungen* und *die zentrale Komponente*) detailliert dargestellt. Speziell die Arten von Verknüpfungen und deren Definition und Funktionalität stehen dabei im Vordergrund.

**Kapitel 5** geht auf die verwaltungstechnischen Konzepte des interaktiven Bauwerksmodellansatzes ein. In diesem Kapitel werden Anforderungen an die Verwaltung und Abarbeitung der Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen und damit Grundlagen für die Etablierung eines effizienten Daten- und Informationsaustausches auf Basis des interaktiven Bauwerksmodells diskutiert. Nach einer kurzen theoretischen Einführung in die Thematik der Softwareagenten und sich daraus konstituierender Multiagentensysteme, beschreibt dieses Kapitel einen Ansatz zur agentengestützten Bauwerksmodellverwaltung.

**Kapitel 6** beinhaltet die Darstellung des der prototypischen Realisierung zugrunde liegenden Systemkonzeptes. Hierbei werden die einzelnen Komponenten des Systemkonzeptes hinsichtlich ihres Zusammenwirkens und ihrer prototypischen Umsetzung detailliert und bewertet. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der experimentellen Anwendung des entwickelten Prototypen.

**Kapitel 7** beschließt den inhaltlichen Teil der Arbeit mit einem Fazit und einer Bewertung der Ergebnisse, gefolgt von einem kurzen Ausblick über mögliche zukünftige lohnenswerte und notwendige Forschungsaktivitäten im Bereich der Definition und Verwaltung digitaler Bauwerksmodelle zur Unterstützung der Integrationsbemühungen.

# Kapitel 2

## Grundlagen Ausgangslage

*... The problems of data exchange and integration  
are significant problems in the building industry ...*

Charles M. Eastman [Eas99]

Die Organisationsformen zwischen den Beteiligten bei der Durchführung von Planungsprojekten im Bauwesen haben sich in den letzten Jahrzehnten gewandelt. Die ständig steigende Komplexität der Bauprojekte führte dazu, daß planungs- und ausführungsbezogene Aufgaben nicht mehr durch einen BAUMEISTER in ihren komplexen Zusammenhängen erkannt und bewältigt werden konnten [KK97]. Forgber resümiert in diesem Zusammenhang [For99]:

*War der Baumeister in früheren Jahrhunderten hauptsächlich mit der integralen Abwicklung des Projektes befaßt, wobei die Koordination der technischen und handwerklichen Umsetzung unter Beachtung des nach den bewährten Gestaltungs- und Konstruktionsregeln entwickelten Entwurfes an diese zentrale Funktion gekoppelt war, ist im zwanzigsten Jahrhundert eine kontinuierliche Verlagerung des Arbeitsschwerpunktes auf die rein gestalterischen Gesichtspunkte zu beobachten. Für den nun als Architekten bezeichneten Baumeister steht die Verwirklichung individueller Gestaltungsvorstellung zunehmend im Vordergrund, die technische und handwerkliche Umsetzung wird dabei von der Konzeption bis zur Fertigstellung des Projektes in zunehmendem Maße an die Spezialisten (Fachingenieure) delegiert.*

Neben der Komplexität der Bauprojekte zeichnet vor allem die immer ausgeprägtere Spezialisierung der Planungsbeteiligten für eine zunehmende Arbeitsteilung verantwortlich [For99], welche darüber hinaus qualitativ und quantitativ durch die zunehmende Globalisierung der Märkte, d.h. durch potentiell international kooperierende Projektteams bei der Bearbeitung von Planungsaufgaben beeinflusst wird [MR94] [BT95] [Bre98] [Eas99] [WH00].

**Situation:**  
KOMPLEXITÄT,  
SPEZIALISIE-  
RUNG,  
GLOBALISIE-  
RUNG

Diesen Sachverhalt unterstreicht Müller [Mül99].

*Die Planung und Erstellung von Gebäuden ist durch ein Zusammenwirken einer Vielzahl von Planern, Auszuführenden und Lieferanten aus unterschiedlichen Disziplinen gekennzeichnet. Dieses große Leistungsspektrum kann von keinem Unternehmen komplett angeboten werden, weshalb Bauvorhaben fast ausschließlich in unternehmensübergreifenden Kooperationen realisiert werden.*

Zusammenfassend kann bei der Durchführung von Planungsprojekten im Bauwesen konstatiert werden, daß die als sehr komplex einzuschätzende Bearbeitung einer (hinreichend großen) Planungsaufgabe die Zusammenarbeit einer Vielzahl verschiedener Beteiligter unterschiedlicher Fachabteilungen bzw. Firmen voraussetzt [SC00] [SAB<sup>+</sup>00]. Die demnach sowohl räumlich als auch zeitlich getrennte Kooperation der Planungsbeteiligten basiert auf dem Einsatz hochspezialisierter Fachapplikationen in heterogenen Systemumgebungen [NBL93] [DMBB98]. Diesen veränderten Organisationsformen hinsichtlich der Kooperation und Kommunikation zwischen den Planungsbeteiligten, ihren Anforderungen und Möglichkeiten (gerade durch den Einsatz innovativer IuK-Technologien), wird derzeit noch nicht ausreichend Rechnung getragen.

**Problem:**  
MANGELNDE  
KOOPERATION  
UND KOMMUNI-  
KATION

Diese Vorbemerkungen reflektierend, skizziert dieses Kapitel die theoretischen Grundlagen, Anforderungen und Zielstellungen der Integration der am Bauplanungsprozeß bzw. Bauwerkslebenszyklus beteiligten Akteure und Fachapplikationen.

## 2.1 Integration im Bauwesen

*In the context of CIC<sup>1</sup>, integration can primarily be understood to mean efficient information sharing and data exchange, using IT as the enabling technology. All the information which is required in a particular task should be accesible almost instantly in a form which can be manipulated using computers.*

Bo-Christer Björk [Bjö95]

Das Fremdwörterbuch [Dro90] liefert zum Begriff Integration folgende Definition:

**Integration** [Wieder]herstellung einer Einheit [aus Differenziertem],  
Vervollständigung; Einbeziehung, Eingliederung in ein größeres Ganzes

Die in der Definition gegebenen differenzierten Begriffsbestimmungen reflektieren sehr gut die unterschiedlichen Auffassungen und Aspekte und das damit verbundene weite Spektrum integrativer Betrachtungen im Bauwesen. Die verschiedenen, im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten, Forschungs- und

---

<sup>1</sup>Anm. des Autors: computer integrated construction

Realisierungsbemühungen spannen einen Bogen von schnittstellenbasierten Vereinigungen weniger Fachapplikationen als primitivste Art der Integration einerseits, bis zur Schaffung holistisch orientierter Arbeitsumgebungen zur Entscheidungsunterstützung in allen involvierten Planungs- und Bauprozessen im Sinne intelligenter integrierter Planungsumgebungen andererseits (s. Abschnitt 3.1.3 und 3.1.4).

Grundsätzlich steht der Begriff INTEGRATION im vorliegenden Kontext für die Realisierung einer computergestützten interprozessualen Daten- und Informationspräsenz; d.h. prinzipielles Anliegen der Integration im Bauwerkslebenszyklus ist die allzeit adäquate Bereitstellung relevanter Daten und Informationen und die Verbesserung der Kooperation und Kommunikation der Beteiligten zur qualifizierten Entscheidungsunterstützung in aktuell auszuführenden Arbeitsprozessen.

**Lösung:**

INTEGRATION  
= INTERPRO-  
ZESSUALE  
DATEN- UND  
INFORMATIONSPRÄSENZ

Die Motivation zu Anstrengungen bezüglich integrativer Planungs- und Arbeitsumgebungen im Bauwesen (wie auch in anderen Industriezweigen) resultiert aus dem Hauptziel und der Notwendigkeit der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit [Kah95]. Diese Verbesserung und eine Steigerung der Nachfrage nach Bauleistung kann durch

- Verbesserung des Preis-/Leistungsverhältnisses,
- Erhöhung der Qualität des Endproduktes - Bauwerk,
- Einhaltung vereinbarter Termine und
- Verringerung der Unzufriedenheit der Bauherren/Auftraggeber

erzielt werden. Das Hauptpotential zur Erreichung dieser Ziele stellen Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen innerhalb des gesamten Bauprozesses dar, welche letztlich durch Ressourcenreduktion jeglicher Art (Arbeitskraft, Betriebskosten, Energie, Planungs- und Bauzeit, ..., Gesamtkosten) realisiert werden können [KH98] [RF00].

**Nutzen:**

VERBESSERUNG  
DER WETTBE-  
WERBSFÄHIG-  
KEIT

Die Integrationsbemühungen, welche auf einen fehlerfreien computergestützten Datenaustausch und -zugriff und mithin auf eine effektive Kooperation und Kommunikation der beteiligten Akteure und Applikationen abzielen, leisten hierbei einen ganz wesentlichen Beitrag zur Zeit- und resultierend auch zur Kostenersparnis. Zeitersparnisse können hauptsächlich durch die korrekte Bereitstellung relevanter Daten in rechnerverarbeitbarer Form erzielt werden. Da somit einerseits die zeitintensive und fehleranfällige manuelle Dateneingabe vermieden wird [TF94] und andererseits zusätzlich benötigte entscheidungsunterstützende Informationen (wie z.B. DIN-Vorschriften, Material- oder Bauteilkataloge) zur Verfügung stehen, wodurch sich planerische Aufgaben effizienter erledigen lassen.

BASIEREND AUF  
EFFIZIENZ- UND  
EFFEKTIVITÄTS-  
STIEGERUNGEN

Weiterhin führen verbesserte Kooperations- und Kommunikationsmöglichkeiten unter Zuhilfenahme von Methoden und Verfahren des CONCURRENT ENGINEERING und des CSCW<sup>2</sup> zu verstärkt paralleler Ausführung von Planungsprozessen und zu holistisch kooperativen Planungsergebnissen, wodurch die Gesamtlaufzeit des Bauprojektes erheblich gesenkt und die Qualität des Endproduktes gesteigert wird [FM97] [Mül97] [ACDB<sup>+</sup>98] [Sch98] [HH00].

Die unter dem Begriff INTEGRIERTE PLANUNG subsummierten Ansätze zu ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtungen [LMSH95] [For99], tragen ebenfalls ganz wesentlich zur Verkürzung von Planungszeiten (Vermeidung unnötiger Iterationen durch rechtzeitige Kommunikation und Kooperation) und zu einer eminenten Verringerung der Betriebskosten des genutzten Bauwerkes bei [KBHH97].

Nach der einführenden Darstellung der Notwendigkeit und der beträchtlichen Vorteile integrativer computergestützter Betrachtungen für den Bauwerkslebenszyklus wird nun die (einleitend bereits in Abschnitt 1.1 formulierte) prinzipielle Frage der Herangehensweise an Integrationsvorhaben diskutiert. Anschließend werden differenzierte Integrationsmöglichkeiten und -ansätze aufgezeigt, welche sich aus divergierenden Zielstellungen und resultierend aus unterschiedlichen logischen und/oder technischen Konzeptionen ergeben.

### 2.1.1 Prozeßcharakter

Der Lebenszyklus eines Bauwerkes gliedert sich in unterschiedliche Phasen. Innerhalb dieser Phasen bildet das Bauwerk zunächst den virtuellen und nach Errichtung den real existierenden Gegenstand der Betrachtungen bzw. der zu erledigenden Aufgaben und Aktivitäten (s. Abbildung 1.1).

LEBENSZYKLUS  
EINES  
BAUWERKES  
UNTEREILT IN  
PHASEN UND  
AKTIVITÄTEN

Eastman identifiziert die in Abbildung 2.1 dargestellten Lebenszyklusphasen und die entsprechenden Zustände, in denen sich das Bauwerk beim Übergang zwischen den verschiedenen Phasen befindet. Jede dieser einzelnen Phasen umfaßt eine große Anzahl verschiedenster Aktivitäten, in Folge deren Ausführung das Bauwerk potentiell den Übergang zur nächsten Phase vollzieht. Da die eingehende Betrachtung der im Bauwerkslebenszyklus involvierten Prozesse (der zielgerichteten Aktivitäten, Handlungsfolgen) nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird für tiefergehende Informationen auf Eastman verwiesen. Dieser gibt, korrespondierend zu den in Abbildung 2.1 dargestellten Lebenszyklusabschnitten, detaillierte Erläuterungen zu den Prozessen, Akteuren und Organisationen, den unterstützenden Applikationen und den benötigten Informationen innerhalb der jeweiligen Phase.

---

<sup>2</sup>Computer Supported Cooperative Work



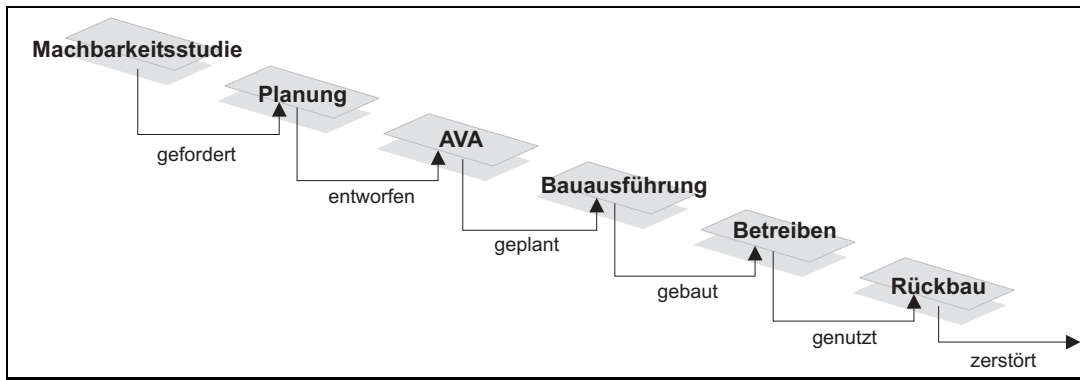


Abbildung 2.1: Lebenszyklusabschnitte nach Eastman [Eas99]

Wesentlich für die Zielstellung dieser Arbeit ist die Tatsache, daß die einzelnen Aktivitäten durch diverse hochspezialisierte, räumlich und zeitlich getrennt kooperierende Akteure in aktivitäts- und phasenspezifischen Rollen unter Zuhilfenahme spezifischer IT-Applikationen und Werkzeuge durchgeführt werden. Prozeßbetrachtende Untersuchungen analysieren demnach folgende Problemstellungen:

- zeitliche Reihenfolge der Aktivitäten
- Bearbeitung durch differenzierte Akteure
- unterschiedliche Rollen der Akteure
- aufgabenspezifische IT-Applikationen und Werkzeuge
- Nutzung erforderlicher und Erzeugung benötigter Informationen.

Ziel der Bemühungen in diesem Kontext ist die Definition von Prozeßmodellen. Sie sollen demnach beschreiben, welche Akteure welche Aufgaben zu welchem Zeitpunkt mit Hilfe welcher Applikationen unter Nutzung welcher Informationen erledigen, um somit eine möglichst effiziente Kooperation und Kommunikation der Beteiligten und damit eine optimale Projektbearbeitung zu gewährleisten. Weitergehende Informationen zur Prozeßmodellierung besonders hinsichtlich verschiedener unterstützender Techniken, Werkzeuge, Beschreibungssprachen und Spezifikationen geben z.B. [WS97] [ACDB<sup>+</sup>98].

Die Definition von Prozeßmodellen erweist sich aus verschiedenen Gründen als äußerst problematisch. Das Hauptproblem hierbei stellt die schwache Strukturiertheit und die extreme Dynamik des Gesamtplanungsprozesses dar [For99]. Während die von Eastman beschriebenen Phasen noch als prinzipiell sequentiell ablaufend angesehen werden können, ist innerhalb der Phasen kaum eine zeitliche oder inhaltsorientierte Strukturierung der einzelnen Aktivitäten erkennbar bzw.

BAU-  
(PLANUNGS)-  
PROZESSE  
SCHWACH  
STRUKTURIERT  
UND EXTREM  
DYNAMISCH

definierbar. Hierbei ist besonders festzustellen, daß gerade zwischen Aktivitäten mit einem hohen Grad an Informationsaustausch ein überwiegend paralleler und zyklisch iterativer Prozeßcharakter vorliegt [AJ95] [FM97] [JKS<sup>+</sup>97] [Huh00b].

Ein zweites Problem bildet die Heterogenität der eingesetzten IT-Plattformen und Applikationen. Bei den zur effizienten Verrichtung der erforderlichen Tätigkeiten eingesetzten IT-Applikationen und Werkzeugen handelt es sich um hochspezialisierte Fachapplikationen, welche eine starke Divergenz hinsichtlich ihrer Komplexität, der verfolgten Zielstellung und des Spezialisierungsgrades aufweisen. Zudem verwenden diese von verschiedensten Herstellern angebotenen Applikationen in der Regel spezifische proprietäre Datenmodelle und Modellverwaltungssysteme (Datenhaltungen) mit entsprechenden datei- oder API<sup>3</sup>-basierten Schnittstellen [DMBB98]. Verschärfend wirkt sich überdies die Tatsache aus, daß ständig neue Methoden und Produkte zur Unterstützung entsprechender Aufgaben Anwendung finden.

SPEZIFISCHE  
APPLIKATIO-  
NEN MIT  
PROPRIETÄREN  
DATENMODEL-  
LEN

Zusammenfassend kann konstatiert werden, daß a priori keine Aussagen zu informationssendenden und - empfangenden Applikationen getroffen werden können und es letztlich unmöglich ist, generelle Informationsbedürfnisse detailliert vorherzusagen [HKT95].

BAUWERKS-  
BESCHREIBENDE  
DATEN  
ERFORDERLICH  
ABER:  
QUALITATIV  
UND  
QUANTITATIV  
NICHT  
VORHERSAGBAR

Trotz der zum Teil gravierenden Unterschiede und der enormen Anzahl der Applikationen, die innerhalb der Prozesse zur Lösung anstehender Aufgaben eingesetzt werden, sind dennoch alle gleichermaßen auf relevante Informationen angewiesen, welche das Bauwerk in einem entsprechenden Kontext definieren bzw. repräsentieren.

## 2.1.2 Informationsbeschaffenheit

Die Gesamtheit der im Lebenszyklus eines Bauwerkes benötigten entscheidungsunterstützenden Informationen kann prinzipiell in projektunabhängige<sup>4</sup> und projektabhängige Informationen unterteilt werden [Kre94].

Die projektabhängigen Informationen umfassen dabei alle relevanten Daten zur Beschreibung des baulichen Objektes und dessen aktuellen Entwicklungsstandes (Bauwerksmodell - Bauwerksmodelldaten s. Abschnitt 2.2 bzw. Abschnitt 3).

In der Regel beziehen die Fachplaner und deren Applikationen diese projektabhängigen Informationen als Ergebnisse zeitlich vorgelagerter Prozesse, da diese projektabhängigen Daten ihre Spezifik erst im Zuge der Bearbeitung (Vorplanung, Entwurf, Errichtung, ...) ausprägen.

**Problem:**  
DATEN(MODELL)-  
INKOMPATIBILITÄT  
ZWISCHEN  
TEILPROZESSEN

<sup>3</sup>Application Programming Interface - Programmierschnittstelle für Applikationen

<sup>4</sup>z.B. baurechtliche Vorschriften, Normen oder Marktinformationen zu Baustoffen, Bauelementen, technologischen Verfahren oder allgemeines Erfahrungswissen

Ein entscheidendes Problem beim effizienten Einsatz der spezifischen Fachapplikationen, deren Strukturen, Arbeitsweisen und Funktionalitäten in dieser Arbeit als gegeben angesehen werden, stellt demnach deren adäquate Bereitstellung dar. Diese umfaßt die korrekte Aufbereitung und Anpassung der erforderlichen Informationen an die speziellen Bedürfnisse des jeweiligen aktuellen Zielprozesses und der damit verbundenen differenzierten Sichten auf die Datengesamtheit [FFH<sup>+</sup>94] [BT95] [KB95] [EJCJ97].

Zum Verständnis sei an dieser Stelle vermerkt, daß der Begriff DATEN sich im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich auf die konkreten Inhalte der applikations- bzw. modellspezifischen Datenstrukturen bezieht. Der Begriff INFORMATION zielt auf Interpretationen der zugrundeliegenden Daten bezüglich bestimmter Zustände oder Vorgänge ab.

INFORMATIONEN =  
INTERPRETATIONEN VON  
DATEN

Die zur Etablierung einer effektiven Kooperation und Kommunikation der Beteiligten unbedingt notwendige Interpretierbarkeit der vorliegenden Daten [Eas99] durch die Fachplaner und Applikationen, speziell in planungsorientierten Phasen und unter dem Aspekt holistischer Lebenszyklusbetrachtungen (s. Abschnitt 2.1), ist nur durch eine allgemein anerkannte Verständigungsplattform gewährleistet [MPR95] [Sch95a] [Amo97] [ACDB<sup>+</sup>98] [AGK<sup>+</sup>00], welche das verteilte Agieren auf abgestimmten Modelldarstellungen realisiert (Abbildung 2.2).

**Lösung:**  
MODELLABGLEICH  
DURCH VER-  
STÄNDIGUNGS-  
PLATTFORM  
BAUWERKSMODELL

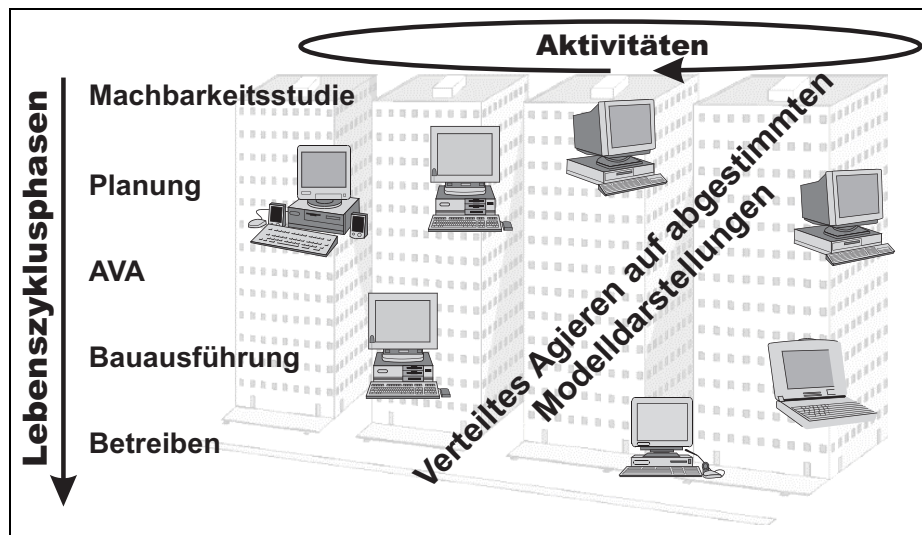


Abbildung 2.2: Basis von Kooperation und Kommunikation

Diese, auf allgemeinem Konsens über die zu verarbeitenden Informationen beruhende Verständigungsplattform, wird nach überwiegender Meinung der auf dem Gebiet integrativer Betrachtungen im Bauwesen Tätigen (s. Abschnitt 2.2) durch ein Produkt- bzw. Bauwerksmodell repräsentiert.

Kretzschmar [Kre94] äußert in diesem Zusammenhang:

*Das Produktmodell ist eine wesentliche Voraussetzung für die Integration des gesamten Planungsprozesses. Dazu muß es die Transformation der objektbeschreibenden Daten zwischen den einzelnen fachspezifischen Partialmodellen (z.B. Fundamentmodell, Tragwerksmodell usw.) unterstützen.*

## 2.2 Bauwerksmodell als Integrationsebene

*The most fundamental requirement for integrated building systems, at whatever level is that all tools of the system have to agree upon a unified description of the built environment, which is the role played by static data modelling.*  
Anumba et al [ACDB<sup>+</sup>98]

Die Integration im Bauwerkslebenszyklus, speziell in den entwerfenden und planerischen Phasen und Aktivitäten, zielt auf die Symbiose der Beteiligten und ihrer Fachapplikationen innerhalb einer effizienten Kooperations- und Kommunikationsumgebung ab.

Die diesbezüglich in Abschnitt 1.1 aufgeworfene Fragestellung nach der grundlegenden Integrationskomponente - DESKRIPTIVES vs. PROZESSUALES Modell - wird nun unter Einbeziehung der oben dargelegten Ausführungen diskutiert.

Ziel der prozessualen Sicht ist die Definition eines Prozeßmodells, also die Identifizierung, Beschreibung und Erstellung eines geordneten Gefüges der involvierten Teilprozesse. Diese aktivitäts- und rollenspezifischen Prozesse sind jedoch, wie in Abschnitt 2.1.1 ausgeführt, sehr schwach strukturiert und hoch dynamisch. Außerdem ist eine umfassende Vorhersage der Qualität und Quantität der benötigten Informationen praktisch unmöglich.

**prozessuale  
Sicht:**  
KOOPERATION  
DURCH  
PROZESS-  
KOORDINATION

Der deskriptive Ansatz verfolgt das Ziel einer computerinternen Abbildung des Betrachtungsgegenstandes Bauwerk als notwendige einheitliche Verständigungs- und Vermittlungsplattform zwischen den verschiedenen Teilprozessen. Dieses VIRTUELLE BAUWERK - ausgeprägt als Produkt- bzw. dem Kontext entsprechend als Bauwerksmodell - stellt demnach ein Ordnungsschema der zugehörigen Datengesamtheit dar [WH00]. Die Datengesamtheit bezieht sich dabei besonders auf die projektabhängigen<sup>5</sup>, also sämtliche das bauliche Objekt beschreibenden Daten und Informationen [Kre94], aber auch auf alle anderen projektbezogenen zur Entscheidungsunterstützung relevanten Informationen im Lebenszyklus [Beu97].

**deskriptive  
Sicht:**  
ABGESTIMMTE  
MODELLDAR-  
STELLUNGEN  
DURCH DATEN-  
INTEGRATION

<sup>5</sup>siehe Abschnitt 2.1.2 zur Erläuterung der Unterteilung

Auf diese Weise realisiert der deskriptive Ansatz mit der Schaffung eines abstrahierten Modells des real existierenden oder zu planenden Bauwerkes und der damit verbundenen adäquaten Bereitstellung aller relevanten Daten die grundlegend notwendige Voraussetzung für die Kooperation und Kommunikation der Beteiligten (Prozesse) und damit letztlich für die Integration im Bauwerkslebenszyklus.

Schlußfolgernd stellt eine deskriptiv orientierte Modellauffassung die fundamentale Voraussetzung integrativer Betrachtungen für den Bauwerkslebenszyklus (und deshalb den ausschließlichen Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit) dar.

Der prozessuale Ansatz ist auf Grund der Dynamik und der Unstrukturiertheit der Prozesse [Ste97, *im* scheinbar chaotischen Entwurfsvorgang] nicht in der Lage, den Teilaktivitäten und Applikationen (Teilprozessen) a priori alle notwendigen Daten und Informationen zu zuordnen, um somit die Kommunikation und Kooperation auf semantisch hohem Niveau sicherzustellen.

Basierend auf dem deskriptiven Bauwerksmodell (s. Abbildung 2.3) und darauf aufbauend, ergeben prozessual ausgerichtete Untersuchungen wesentliche Beiträge zur kooperationsbezogenen Effizienz- und Effektivitätssteigerung [SH97] [ACDB<sup>+</sup>98] [SBK<sup>+</sup>98] [Sch98] [GTKB00] [Huh00a].

PROZESSUALE  
INTEGRATION  
SETZT DATEN-  
INTEGRATION  
VORAUS

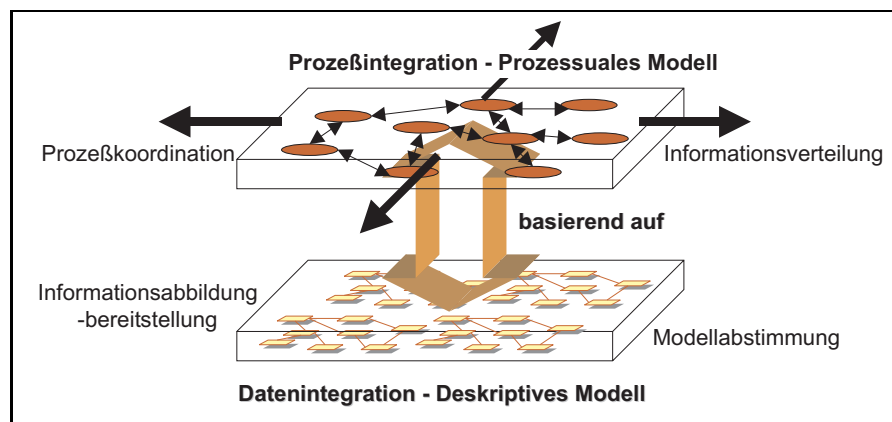


Abbildung 2.3: Prozessuale Sicht basierend auf deskriptivem Modell

Die Auffassung des Primats einer deskriptiven Repräsentation des gemeinsamen Bearbeitungsgegenstandes wird durch eine große Anzahl der in diesem Kontext erschienenen Publikationen belegt:

- [FFH<sup>+</sup>94, IBDE]

- [JLA95b, *There is a broad understanding that a conceptual or more precisely product model is the key to intelligent data exchange and communication between different applications ...*]
- [AJ95, *... a solid theoretical well-founded concept for a Product Model is a must for genuine progress in the area of integrated CABD*]
- [KK97, *... the most crucial aspect of a collaborative environment would be a building representation that can be shared by all disciplines, and can become a basis of a shared understanding ...*]
- [SP98, *... there is a consensus on the need of developing a neutral data format and its use as a data exchange medium between all the AEC applications. This neutral format is usually known as integrated data model or building product model.*]
- [JL98, *... a 'future integral design environment' ... needs at least two basic technologies. First the software has to understand the semantic of the objects ... The solution is a 'semantically kernel' as a basis for applications, a product data model.*]
- [DMBB98, *Promoted for years now by the research community, ... the Product Modelling approach ... offers to reconcile so-called islands of automation and allow them to interoperate thanks to a Project Information Server that will offer to each actor a consistent representation of the project information.*]
- [KH98, *... a number of researchers (e.g. Eastman 1988; Gielingh 1988; Turner 1988) have introduced product data technology (PDT) in construction and have suggested it is the key approach for information exchange and sharing in A/E/C projects.*]

Dieser Sachverhalt wird weiterhin zum einen durch die Tatsache bestätigt, daß den Arbeiten und Untersuchungen vieler bedeutender (zum Teil EU-geförderter) integrationsunterstützender Projekte durchaus differenzierte aber deskriptive Bauwerksmodelle zugrunde liegen [JLA95b, Kat95, COMBI] [Poy95, TP95, ATLAS] [Aug95, COMBINE] [JKS<sup>+</sup>97, SBK<sup>+</sup>98, VEGA] [Sch98, Was98, ToCEE] [HH99, ARMILLA]. Er wird zum anderen durch die enormen Standardisierungsbemühungen im Rahmen produktbeschreibender Spezifikationen wie STEP (Standard for the Exchange of Product data Model ISO-10303), CIMsteel (Computer Integrated Manufacturing for Constructional Steelwork) und IAI-IFC (International Alliance for Interoperability - Industry Foundation Classes) untermauert (s. Abschnitt 3.1.4).

### 2.2.1 Integrationsgrundlagen

Der Einsatz computerbasierter Methoden und Techniken (etwa ab den 50er-Jahren) im Rahmen der vielen im Bauwerkslebenszyklus involvierten Prozesse zielte zunächst auf die Entscheidungsunterstützung der Fachplaner innerhalb der ihnen zugeordneten (isolierten) Aktivitäten ab.

Hierbei standen in erster Linie die effektivere und effizientere Gestaltung der Arbeitsprozesse aber auch die Möglichkeit der Einführung neuer Technologien (z.B. Finite Elemente Methode) im Vordergrund, welche ohne die Leistungsfähigkeit und Rechenkapazität der nun Verwendung findenden Computer und Softwareapplikationen unmöglich oder aber zumindest unpraktikabel waren.

Durch die damit verbundene rechnerinterne Modellierung der zur Lösung der spezifischen Aufgaben benötigten Repräsentationen des Bearbeitungsgegenstandes und insbesondere der erforderlichen Ein- und Ausgabewerte entstand nahezu parallel auch das Bedürfnis, diese einmal rechnerintern pro Teilprozeß vorliegenden Daten (-strukturen) auch anderen in der Bearbeitungschronologie später darauf angewiesenen Teilprozessen zur Verfügung zu stellen.

Für dieses Bereitstellen von Informationen werden im folgenden prinzipielle Integrationsansätze klassifiziert und bewertet sowie technische Realisierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Zunächst kann die Integration der Prozesse bzw. Applikationen nach ihrem Umfang bzw. ihrer Reichweite unterschieden werden, wobei Bakkeren und Tolman in lebenszyklusbetrachtende, interdisziplinäre und intradisziplinäre Integration [BT95] (s. Abbildung 2.4) unterteilen.

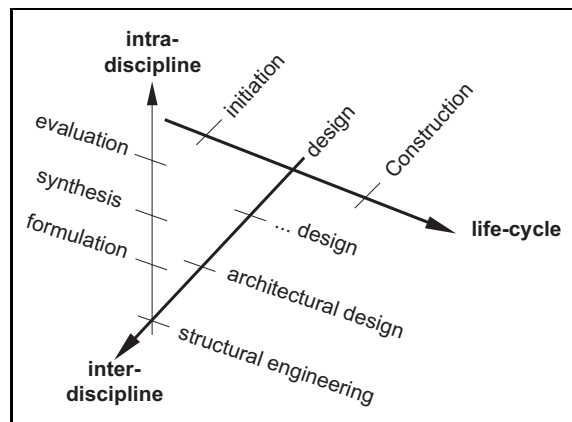


Abbildung 2.4: Integrationsrichtungen nach Bakkeren und Tolman [BT95]

Eine ähnliche Form der Klassifizierung in Integration über alle Fachdisziplinen, alle Tätigkeiten einer Fachdisziplin und über alle Arbeitsschritte einer Tätigkeit schlägt Lück [Lüc96] vor.

Die einzelnen Integrationsansätze unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich der Anzahl der eingesetzten Applikationen der involvierten Fachplaner und der daraus resultierenden Menge auszutauschender Daten und Informationen. Demnach steigt die Komplexität beginnend bei der Integration verschiedener Arbeitsschritte einer Tätigkeit bis hin zur Integration aller im Lebenszyklus beteiligter Akteure und Applikationen erheblich.

Lück beschränkt seine Untersuchungen ausschließlich auf die Integration aller Tätigkeiten einer Fachdisziplin. Dies begründet er einerseits mit der bereits hinreichend guten (auch kommerziellen) Unterstützung der Integration der Arbeitsschritte einer Tätigkeit und andererseits mit der (seiner Meinung nach) nicht handhabbaren Komplexität der Integration über alle Fachdisziplinen. Trotzdem muß es Ziel allgemeiner Integrationsbetrachtungen (so auch in dieser Arbeit) sein, die Integration für den kompletten Lebenszyklus also über alle involvierten Fachdisziplinen anzustreben und zu unterstützen.

Aus technischer Sicht lassen sich unter der Voraussetzung des Einsatzes unterschiedlicher unabhängiger Fachapplikationen mit proprietären (prinzipiell unbekannten) Datenhaltungen und -formaten je Disziplin bzw. Aktivität verschiedene Realisierungen der Integration also der Etablierung eines computergestützten Daten- und Informationsaustausches identifizieren [HKT95] [GGK99].

**Bauwerksmodellstruktur (1):**  
FUNKTIONSBEZUGENE ANFORDERUNGEN (INTEGRATIONS-PLATTFORM)

**Direkte Kopplung** Die direkte Kopplung verbindet jeweils paarweise zwei Applikationen mittels datei-basiertem Datenaustausch oder durch die Kenntnis und Verwendung eines API (s. Abbildung 2.5). Diese Art der Kopplung bietet den höchsten Grad an Semantikerhaltung während des Datenaustausches, ist jedoch insbesondere bei steigender Anzahl der Applikationen sehr aufwendig und sehr schwer wartbar.

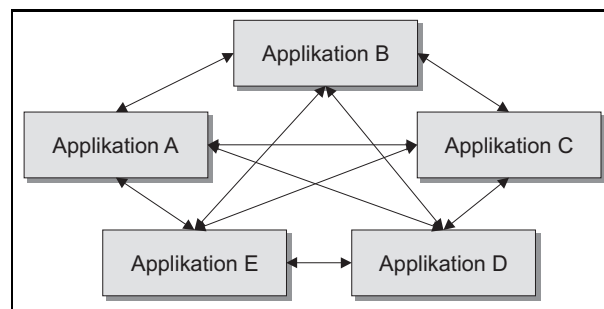


Abbildung 2.5: Applikationsspezifische Datenüberführung

**Indirekte Kopplung** Ziel der indirekten Kopplung (s. Abbildung 2.6) ist die Kopplung mehrerer Applikationen durch ein neutrales (standardisiertes) Datenformat ausgeprägt als Dateiformat oder beispielsweise auch als Datenbanksche-



ma. Im Rahmen dieses Integrationsansatzes muß eine beteiligte Applikation ihre Aus- und Eingabedaten jeweils in das neutrale Format überführen oder aus dem neutralen Format extrahieren. Als problematisch erweisen sich hier die generellen Schwierigkeiten bei Standardisierungsbemühungen, welche sehr schnell zu extrem komplexen Beschreibungen führen, die dann nur partiell umgesetzt werden (können), wodurch letztlich das Ziel eines effizienten Datenaustausches verfehlt wird.

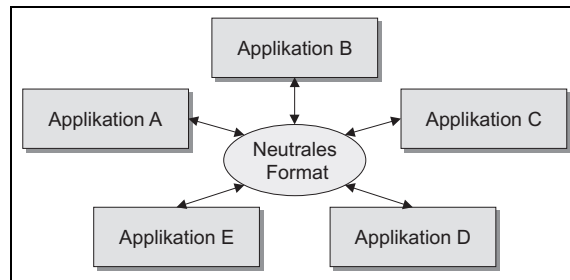


Abbildung 2.6: Datenüberführung durch neutrales Modell

**Lose Kopplung** Die dritte prinzipielle Möglichkeit der Integration verschiedener domänenspezifischer Applikationen wird als lose Kopplung bezeichnet (siehe auch [AG00]). Diese Variante eliminiert die Probleme der direkten Kopplung<sup>6</sup>, welche softwaretechnisch sehr schnell an ihre Grenzen stößt und die Nachteile der indirekten Kopplung, welche aus Ermangelung eines applikationsumfassenden neutralen Formates scheitert, durch einen Kopplungsansatz, der nur die notwendigen Informationen zwischen den domänenspezifischen Applikationen (Modellen) - also deren Schnittmengen - austauscht (Abbildung 2.7).

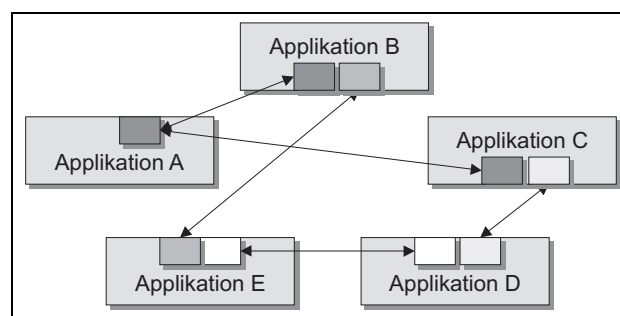


Abbildung 2.7: Schnittmengenaustausch

<sup>6</sup>auch als enge Kopplung bezeichnet

Die lose Kopplung bietet gegenüber den anderen beiden Ansätzen entscheidende Vorteile:

- Realisierbarkeit (keine Notwendigkeit eines neutralen umfassenden Datenschemas)
- Effizienz (exklusiver Austausch relevanter Daten und Informationen)
- Skalierbarkeit (mit steigender Anzahl der Applikationen und Modelle bleibt diese Kopplungsart handhabbar).

Auf Grund der genannten Vorteile findet eine Variante der losen Kopplung im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl bei der konzeptuellen Betrachtung als auch bei der prototypischen Realisierung der domänenübergreifenden Integration der involvierten Applikationen Anwendung.

Der indirekte und auch der lose Kopplungsansatz machen bereits von einem Modell, also von einer zweckbezogenen Abstraktion der Datengesamtheit, Gebrauch. Die Existenz und Verwendung verschiedener derartiger Modelle eröffnet weitere Möglichkeiten zum Datenaustausch [HKT95] [FY00] wie die Verwendung applikations- und domänenspezifischer Modelle, die Verwendung sogenannter common resources (gemeinsam verwendbarer grundlegender Datenstrukturen) oder allgemeiner Kernmodelle (core models).

**Modellcharakter:**  
KOPPLUNGS-  
ANSÄTZE AUF  
MODELLBASIS  
VORTEILHAFT

Weitere eher technisch zu bewertende Integrationsversuche setzen auf den Einsatz neuer IT-Technologien wie z.B. Komponententechnologie [Sch00], Middlewarearchitekturen, CSCW, Groupwareansätze [HHS00] [HH00] oder Web-basierte Techniken [Mül99] [For99], welche im wesentlichen auf die Unterstützung verteilt kooperativer Aspekte abzielen, die jedoch die grundsätzliche Beschaffenheit der auszutauschenden Daten bzw. Datenstrukturen und speziell deren Semantik kaum beeinflussen.

Derartige integrationsunterstützende Technologien liegen nicht direkt im Fokus dieser Arbeit, weshalb hier auf eine detaillierte Untersuchung dieser Konzepte verzichtet wird.

Auch die Betrachtung aus technischer Sicht zeigt, daß ernsthafte lebenszyklusorientierte Integrationsversuche nur auf Basis modellorientierter Abbildungen der auszutauschenden Daten und Informationen erfolgversprechende Ansätze liefern. Dies artikuliert sich insbesondere dadurch, daß wie bereits erwähnt (s. Abschnitt 2.2), der überwiegenden Mehrzahl der den Gesamtlebenszyklus im Bauwesen unterstützenden Integrationsansätze ein modellbasierter Daten- und Informationsaustausch zugrunde liegt.

### 2.2.2 Verwaltungs- und Austauschaufgabe

Die Existenz eines VIRTUELLEN BAUWERKES, in Form eines strukturdefinierenden Ordnungsschemas (Bauwerksmodell) und den zugehörigen, den aktuellen Bearbeitungs- bzw. Projektfortschrittsstand definierenden und dokumentierenden Bauwerksmodelldaten, stellt die Grundvoraussetzung für die Integration der Beteiligten und Fachapplikationen dar. Um als Integrationsplattform fungieren

**Virtuelles  
Bauwerk:**  
ZUSAMMENFASSUNG  
VON  
ORDNUNGS-  
SCHEMA UND  
DATENBASIS

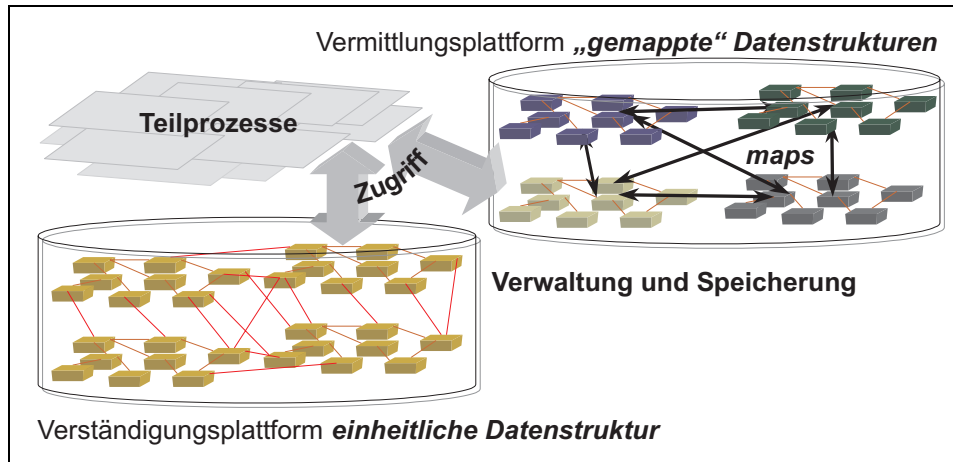


Abbildung 2.8: Aufgaben des Virtuellen Bauwerks

zu können (s. Abbildung 2.8), muß dieses derartig aufgefaßte virtuelle Bauwerk jedoch zwei wesentliche Kriterien erfüllen:

**Verwaltungsaufgabe** Das virtuelle Bauwerk muß unter Zuhilfenahme geeigneter Methoden, Techniken und Werkzeuge in der Lage sein, alle benötigten Informationen zum aktuellen baulichen Objekt zu verwalten und persistent zu speichern. Anderl et al. sprechen diesbezüglich von einem Produktdatenmanagementsystem [AGK<sup>+</sup>00]:

*Zentrale Komponente der Informationsmanagementarchitektur ist ein Produktdatenmanagementsystem, das die Funktionen zum Speichern und Verwalten von Daten und Informationen bereitstellt. Hierbei kann es sich sowohl um produktspezifische Informationen handeln (Daten des Produktmodells), als auch um firmenspezifisches Wissen oder allgemein verfügbare Daten.*

Die Art und Weise der Verwaltung und Speicherung ist von vielen Faktoren abhängig, auf welche in Kapitel 3 detaillierter eingegangen wird. Auf Grund der potentiell großen und inhomogenen Datenmengen in Bauprojekten und der notwendigen Zugriffs- und Verwaltungsfunktionalität stellen Datenbanken und entsprechende ((objekt-) relationale oder objektorientierte) Datenbankmanagementsysteme den prädestinierten Ansatz zur Datenverwaltung dar [BBCR95].

**Austauschaufgabe** Die zweite grundsätzliche Aufgabe dieser als Virtuelles Bauwerk verstandenen Integrationsebene ist die Definition und Bereitstellung allgemeingültiger (für alle beteiligten Fachplaner und -applikationen interpretierbarer) formalisierter Datenstrukturen. Diese hat im Sinne einer Verständigungs- bzw. Vermittlungsplattform einen effizienten verlustfreien Daten- und Informationszugriff und -austausch zwischen den Beteiligten zu realisieren, welcher auf dieser Ebene unabhängig von den proprietären Datenstrukturen und Datenhaltungssystemen der verschiedenen Softwarehersteller ist. Demnach muß das Virtuelle Bauwerk jederzeit den effizienten Zugriff auf die für alle involvierten Prozeßbeteiligten (Fachplaner und Applikationen) relevanten Daten und Informationen sicherstellen. Den weit schwierigeren und komplexeren Teilaspekt dieser Aufgabe bildet jedoch die Bereitstellung der interpretierbaren allgemeingültigen Datenstrukturen bzw. die Vermittlung und Transformation [EJCJ97, ... *routines that convert data from one class to another, called maps* ] zwischen teilprozeßrelevanten Datenstrukturen (s. Abschnitt 3.2.1).

Resultierend aus den Betrachtungen dieses Kapitels widmet sich das nächste Kapitel der ausführlichen Beschreibung und Darstellung der Definition, der Strukturen, der Verwendung und der Verwaltung digitaler Bauwerksmodelle.

# Kapitel 3

## Digitale Bauwerksmodelle

*... The challenge before us is  
to develop an electronic representation of a building, in a form capable of  
supporting all major activities throughout the building lifecycle. ...*

Charles M. Eastman [Eas99]

Im vorangegangenen Kapitel wurden grundlegende Aspekte der Integration im Bauwesen aufgezeigt und diskutiert. Es wurde die zwingende Notwendigkeit einer allgemein zugänglichen Verständigungsplattform (Datenintegrationsebene) für die Kooperation und Kommunikation (Daten- und Informationsaustausch) zwischen den Beteiligten und ihren Fachapplikationen hervorgehoben.

Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde konstatiert, daß diese Verständigungsplattform auf allgemein interpretierbaren Datenstrukturen basieren muß. Die erforderlichen Daten und deren Strukturierung bzw. deren Beziehungsgefüge müssen durch die deskriptiv ausgerichtete Modellierung des allen gemeinsamen Planungsgegenstandes abstrahiert werden.

Obigen Analysen folgend werden in diesem Kapitel neben einem kurzen historischen Abriß zunächst grundlegend benötigte Aussagen zur Motivation, Definition, Strukturierung und zum Einsatz von Produkt- bzw. Bauwerksmodellen getroffen. Parallel wird aus der Evaluierung verschiedener bisheriger kontextbezogener Projekte und der Einbeziehung spezieller Anforderungen an Bauwerksmodelle eine für diese Arbeit gültige Definition des Begriffes Bauwerksmodell erarbeitet, welche sich aus der Synthese verschiedener anerkannter publizierter Definitionen und den konkreten Zielstellungen und Vorgaben dieser Arbeit ableitet.

### 3.1 Evolution digitaler Bauwerksmodelle

In den bisherigen Kapiteln wurde bereits an den entsprechenden Stellen (s. Abschnitte 1.1, 2.1.2 und 2.2) auf die Motivation zur Untersuchung und Entwicklung digitaler Produkt- bzw. Bauwerksmodelle eingegangen. Dieser Aspekt soll im folgenden detaillierter untersetzt werden.

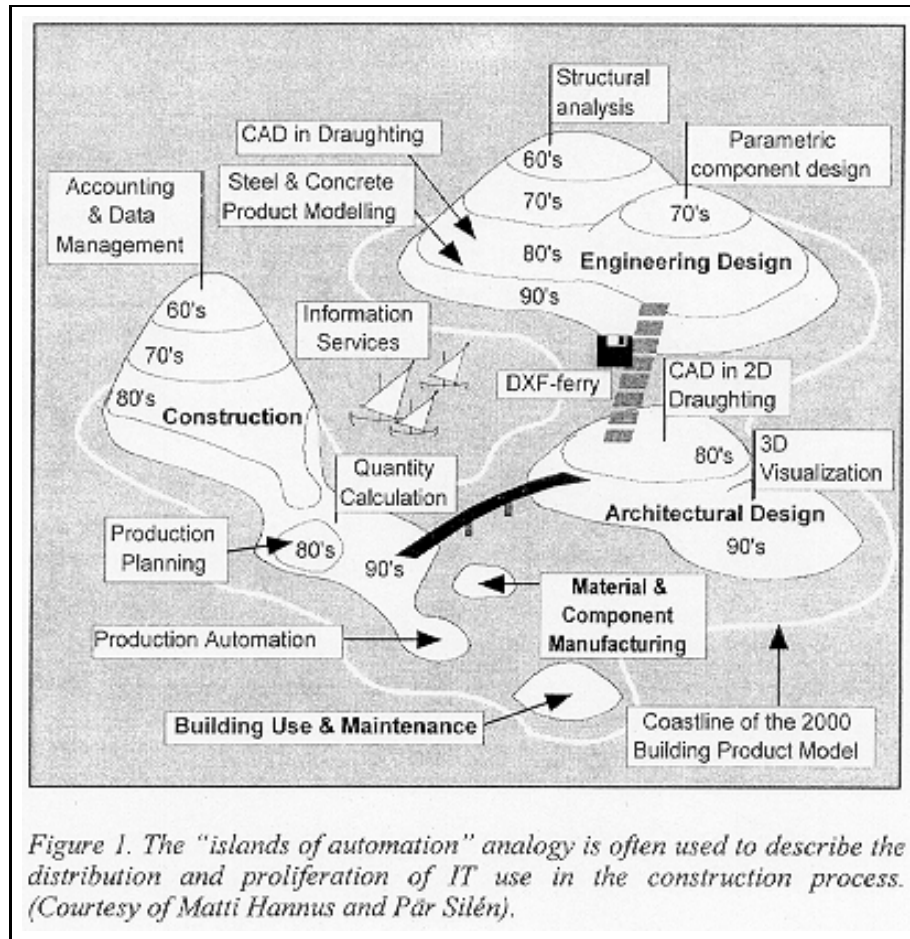


Abbildung 3.1: „islands of automation“ entnommen aus: [Bjö95]

Es wurde herausgestellt, daß der Entwurf, die Konstruktion und die Fertigung von Produkten durch die Kooperation vieler Akteure unter Verwendung extrem heterogener Hard- und Softwaresysteme geprägt sind. Diese Situation begründet sich zunächst durch die Vielfalt der unterschiedlichen in diesen Phasen zu erledigenden Aufgaben und durch das enorme Angebot verschiedener verfügbarer Applikationen (selbst innerhalb spezifischer Teilprozesse). Als äußerst problematisch stellt sich dieser Zustand jedoch im Rahmen der notwendigen prozeßübergreifenden Kooperation und Kommunikation (Daten- und Informationsaustausch) zwischen den beteiligten Akteuren und deren Fachapplikationen heraus [WH00]. Weder

die bislang vorherrschende zeichnungs- bzw. geometrieorientierte Datenhaltung und -modellierung (z.B. solid modelling, parametric modelling), innerhalb der in diesen Phasen vornehmlich eingesetzten CA(A)D<sup>1</sup>-Systeme, noch der entsprechende Datenaustausch zwischen den Applikationen (z.B. DXF, IGES) stellen einen adäquaten Ansatz zur Verbesserung bzw. Beseitigung der Situation der „islands of automation“ (s. Abbildung 3.1) dar.

Als Hauptgrund hierfür ist die Unzulänglichkeit der rein geometriebasierten Modelle und Austauschformate bei der Zuordnung und Speicherung zusätzlicher, in nahezu allen involvierten Prozessen benötigter Daten und Informationen wie Material, physikalische Eigenschaften und spezifisches Verhalten von Bauteilen oder Baustoffen zu den (reale Objekte repräsentierenden) Zeichnungselementen zu nennen.

Weiterhin stellt sich das Problem der verschiedenen erforderlichen Sichten auf ein Objekt (Bauteile o.ä.) [JLA95a]. Aus der reinen geometrisch-graphischen Darstellung und Speicherung der Objekte lassen sich nur bedingt andere benötigte Repräsentationen, wie beispielsweise abstrahierte Darstellungen in anderen Entwurfsphasen oder alphanumerische Darstellungen in kostenbetrachtenden Prozessen ableiten.

**Situation:**  
ZEICHNUNGS-  
ORIENTIERTE  
MODELLIERUNG  
BZW.  
AUSTAUSCH-  
FORMATE  
UNZUREICHEND

Daraus resultierend ergibt sich die Notwendigkeit spezieller Datenstrukturen, in denen alle Informationen eines zu erstellenden Produktes integriert werden können [NBL93]. Björk [Bjö95] wirft diesbezüglich folgende Fragestellung auf:

*How should we structure digital information describing a building in order to facilitate as much as possible, the exchange of information between the computing applications in construction which produce or utilise this data.*

Diese geforderte strukturierte Sammlung aller das Produkt in jeder seiner Lebensphasen beschreibenden und repräsentierenden Daten und Informationen kann als Produktmodell - als zweckbezogenes rechnerinternes Abbild des realen Gegenstandes Produkt - angesehen werden.

### 3.1.1 Begriffliche Grundlagen

Die sich ursprünglich im CIM<sup>2</sup>-Bereich entwickelnden Ansätze der Produktmodellierung, deren Wurzeln hauptsächlich in den technischen Industriezweigen wie Flugzeugbau, Autoindustrie, Schiffbau und Maschinenbau liegen, resultieren in einer großen Anzahl von Produktmodelldefinition. Dem integrierenden Ansatz dieser Arbeit folgend wird hier stellvertretend die Definition eines integrierten Produktmodells von Polly [Pol96] herangezogen.

<sup>1</sup>Computer Aided (Architectural) Design

<sup>2</sup>Computer Integrated Manufacturing

*Ein integriertes Produktmodell beinhaltet die Abbildung aller relevanten Produktmerkmale, die in den einzelnen Lebensphasen entstehen, auf der Basis einer einheitlichen, allgemeinen, lebensphasenübergreifenden und redundanzfreien Grundstruktur.*

Diese Definition beruht auf der Definition eines technischen Produktes (nach Braun)[Pol96]: als

*... das Ergebnis einer gedanklichen Realisierung technischer Probleme und Aufgaben.*

Im vorliegenden Kontext des Bauwesens kann prinzipiell das zu errichtende oder zu planende Bauwerk als (technisches) Produkt angesehen werden. Die spezifischen vom technischen Produkt im Maschinenbaukontext differierenden Wesensmerkmale von Bauwerken zunächst außer Acht lassend (diese werden im Rahmen der Anforderungen an Bauwerksmodelle diskutiert s. Abschnitt 3.3), können entsprechende Bauwerksmodelldefinitionen angegeben werden.

Kretzschmar et al. [Kre94] sprechen vom Bauwerk als Produkt und definieren:

*Das Produktmodell umfaßt als logische Einheit alle für die Beschreibung des baulichen Objektes relevanten Daten. Das Produktmodell repräsentiert im Planungsprozeß den jeweils aktuellen Entwicklungsstand des zu planenden baulichen Objektes. Es ist zugleich Grundlage für einen durchgängigen Informationsfluß und für die fachübergreifende Zusammenarbeit im Planungsprozeß.*

Dieser Intention folgend, ohne nähere Informationen zur Strukturierung der Datengesamtheit gebend, definieren Bakkeren und Tolman [BT95]:

*A product model is a computer-interpretable, complete and unambiguous description of the product being designed, constructed, and operated. It supports the communication between computer-aided activities by storing all the information that needs to be exchanged within the project ....*

Sinngemäß zu den obigen Definitionen erklären Meissner et al. [MPR95]:

*A product model is the specification of descriptive information for all stages of a product during its whole life cycle. The specification has to be done in a structured and computer-oriented way.*

Zusammenfassend kann als wesentliche Aussage dieser bauwerksmodellbezogenen Definitionen die Forderung nach einer deskriptiv orientierten, strukturierten Erfassung aller das Bauwerk über seinen kompletten Lebenszyklus beschreibenden Daten herausgestellt werden. Als Manko dieser Definitionen muß jedoch deren Unkonkretheit bzw. deren Mangel an Aussagen und Festlegungen bezüglich der



Strukturierung und des Inhalts eines entsprechenden Bauwerksmodells genannt werden, wodurch diese Definitionen als Grundlage einer tatsächlichen Realisierung eines Bauwerksmodells als zu abstrakt zu bewerten sind.

Eine in diesem Sinne detailliertere Definition gibt Björk [Bjö95], der mithin bereits zwischen einem Schema (Struktur und Beziehungsbeschreibung der Datengesamtheit - Bauwerksmetamodell) und den tatsächlichen Daten zu einem speziellen baulichen Objekt (Bauwerksmodell) differenziert.

Hierzu beschreibt er zunächst ein konzeptuelles Schema<sup>3</sup> *conceptual schema* als eine strukturierte Sammlung der verwendeten Konzepte (im Sinne von Begriffen) für die verschiedenen im betrachteten Kontext relevanten Objekte (Entitäten). Diese Objekte besitzen Eigenschaften, welche aus informationstechnischer bzw. informationsverarbeitender Sicht als Attribute repräsentiert werden.

**Building product data model** *A type of a conceptual schema where the universe of discourse consists of buildings throughout their design, construction, operations and maintenance. A building product data model models the spaces and physical components of a building directly and not indirectly by modelling the information content of traditional documents used for the building.*

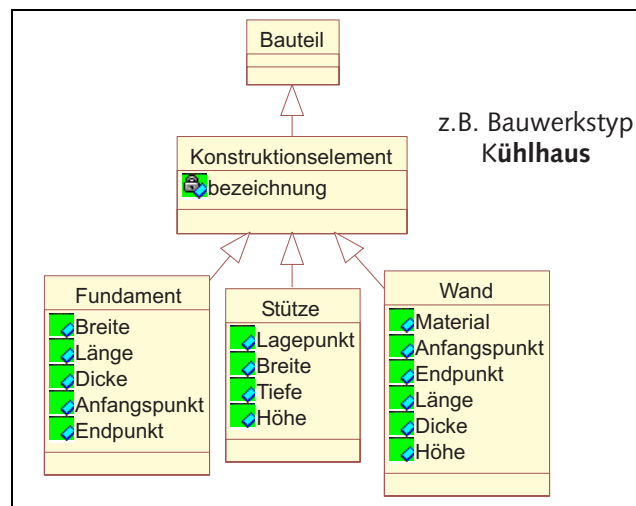


Abbildung 3.2: Ausschnitt eines *building product data model*


**Building product model** *An information base describing some particular building. The structure of the information base is in conformance with a precisely defined conceptual schema (the corresponding building product data model).*

<sup>3</sup>auch als Schemaebene, Metaebene oder konzeptuelle Ebene bezeichnet

Diesbezüglich konstituiert sich das *building product data model*, basierend auf einem konzeptuellen Schema, als Beschreibung der notwendigen Objekte und Eigenschaften (s. Abbildung 3.2), um den betrachteten Gegenstand UoD<sup>4</sup> (Bauwerk) abzubilden. Im Unterschied dazu (s. Abbildung 3.3), beinhaltet das *building*

Stütze 1	
Bezeichnung	Stütze_A1
Lagepunkt	2.30,2.30,0
Breite [m]	1.45
Tiefe [m]	1.45
Lichte Höhe [m]	3.54

Stütze 2	
Bezeichnung	Stütze_A2
Lagepunkt	8.30,2.30,0
Breite [m]	1.45
Tiefe [m]	1.45
Lichte Höhe [m]	3.54

Ausprägung: Kühlhaus Gera	
	

Wand 1	
Bezeichnung	Außenwand-Süd
Anfangspunkt	0,0,-0.60
Endpunkt	34.60,0,8.00
Länge [m]	34.6
Dicke [m]	0.68
Höhe (Gesch. A+B) [m]	8.6
Material	Ziegelmauerwerk

Wand 2	
Bezeichnung	Außenwand-Süd
Anfangspunkt	34.60,0,-0.60
Endpunkt	34.60,46.60,8.00
Länge [m]	46.6
Dicke [m]	0.68
Höhe (Gesch. A+B) [m]	8.6
Material	Ziegelmauerwerk

Abbildung 3.3: Exemplarisches *building product model* (entspr. Abb. 3.2)

*ding product model* die (nicht notwendigerweise existierenden) Ausprägungen der Objekte und ihrer spezifischen Eigenschaften, bezogen auf ein konkretes zu planendes oder zu errichtendes Bauwerk.

Für die sich direkt anschließenden Abschnitte kann zunächst prinzipiell die Bauwerksmodelldefinition nach Björk als hinreichende begriffliche Verständigungsbasis angesehen werden.

Für den Kontext dieser Arbeit werden jedoch folgende begriffliche Substitutionen vorgenommen, wobei das eigentliche Schema oder Datenmodell als Bauwerksmodell und die tatsächlichen Ausprägungen des Schemas (der Objekte und Attribute) Bauwerksmodellldaten genannt werden.

- *building product data model*  $\Leftrightarrow$  **Bauwerksmodell** (s. Abbildung 3.2)
- *building product model*  $\Leftrightarrow$  **Bauwerksmodellldaten** (s. Abbildung 3.3)

Im Laufe der weiteren Erörterungen innerhalb dieses Kapitels zu speziellen Anforderungen an Bauwerksmodelle und zur Kontextspezifik der vorliegenden Arbeit wird diese Definition sukzessive angepaßt und erweitert.

---

<sup>4</sup>universe of discourse

### 3.1.2 Spezifikation von Bauwerksmodellen

*The main problem of modelling design information is its complexity.*

Neverveen et al [NBL93]

Die zu Beginn des Abschnitts 3.1 aufgeführten Nachteile der zeichnungs- bzw. geometriebasierten Modellierung erzwingen einen Wandel hin zum objektorientierten Modellierungsparadigma. Objekte<sup>5</sup>, als Repräsentanten tatsächlich real existierender Entitäten (Bauteile etc.), bündeln sämtliche für sie relevanten Eigenschaften. Die Existenz von Entwurfsobjekten ist nicht an eine bestimmte geometrische Repräsentation oder Definition geometrischer Daten gebunden. Entsprechend der vorhandenen Attribute und des spezifischen Verhaltens können Entwurfsobjekte verschiedene Repräsentationen aufweisen und somit aus unterschiedlichen Sichten betrachtet werden. Junge et al. urteilen [JLA95a]:

**Ansatz:**  
BAUWERKSMO-  
DELLIERUNG  
AUF DER BASIS  
VON  
ENTWURFS-  
OBJEKTEN

*This is the fundamental step, which creates the basis for a consistent application of the product model philosophy.*

Dieser Schritt ist zudem durch die gegebene Affinität von Objekten des oo-Paradigmas<sup>6</sup> mit den real existierenden bzw. vorausgedachten (Entwurfs-) Objekten (innerhalb eines Bauprojektes) leicht nachvollziehbar.

Die Verwendung von Entwurfsobjekten besitzt, wie oben ausgeführt, große Vorteile und ist unbedingt notwendig. Andererseits ist sie jedoch für das signifikante Problem (s. Zitat zu Beginn dieses Abschnittes) der Bauwerks- bzw. Produktmodellierung, nämlich für deren Komplexität mitverantwortlich.

Die außerordentlich große Anzahl und Differenziertheit der benötigten Daten (geometrische, funktionale und physikalische Eigenschaften von Entwurfsobjekten und deren vielfältige Beziehungen untereinander) in Verbindung mit der Vielzahl von Informationsbedürfnissen der verschiedenen zu unterstützenden Fachplaner, besonders im Rahmen prozeßübergreifender Lebenszyklusbetrachtungen, führen zu einer extremen, in diesem Umfang nicht handhabbaren Komplexität.

**Problem:**  
EXTREME  
KOMPLEXITÄT  
DER DATEN IM  
BAUWERKSLE-  
BENSZYKLUS

Auf Grund dieser Komplexität ist es unmöglich, ein Bauwerksmodell zu definieren bzw. zu erstellen, welches sich nur durch die unstrukturierte Akkumulation von Entwurfsobjekten konstituiert.

Die Erstellung von Bauwerksmodellen erfordert unbedingt die Einführung komplexitätsreduzierender Maßnahmen.

Aus modellierungstechnischer Sicht ergeben sich Möglichkeiten zur Komplexitätsverminderung durch die Verwendung von Abstraktionsmechanismen [NBL93], wie:

<sup>5</sup>in diesem Kontext als Entwurfsobjekte [HS95] bezeichnet

<sup>6</sup>objektorientiertes Paradigma

- Intension / Extension (Klassifikation)
- Generalisierung / Spezialisierung (Vererbung)
- Komposition / Dekomposition (Aggregation)
- Sichten.

Derartige Mechanismen (s. Abbildung 3.4) dienen in erster Linie zur Identifizierung von Konzepten<sup>7</sup> oder Begriffen, denen die Entwurfsobjekte zu- bzw. untergeordnet werden, um somit eine Strukturierung bzw. Klassifizierung der Datengesamtheit zu erzielen. Anschließend kann dann auf der Konzeptebene (s. Abbildung 3.2) operiert werden, welche eine deutlich geringere Komplexität aufweist. Weitere Informationen zu Abstraktionsmechanismen und zu den grundsätzlich notwendigen Modellbildungsprozessen geben z.B. Nederveen, Bakkeren und Luiten [NBL93], Bergmann et al. [BBCR95], Steinmann [Ste97], Olbricht [Olb98] und Eastman [Eas99].

ABSTRAKTIONS-  
MECHANISMEN  
ZUR KOMPLE-  
XITÄTSVERMIN-  
DERUNG

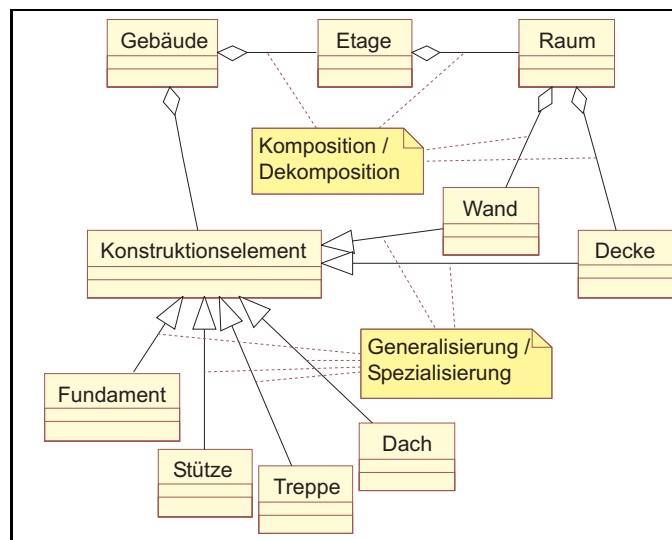


Abbildung 3.4: Beispiele für Abstraktionsmechanismen

Eine weitere Möglichkeit der Komplexitätsverminderung ergibt sich durch die Aufspaltung des Bauwerksmodells in verschiedene Teil- oder Partialmodelle. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 3.2.1 ausführlich dargestellt.

### Modellierungskonzept: Objektorientiertes Paradigma

Die Adäquatheit des oo-Paradigmas zur Modellierung der Datengesamtheit eines betrachteten Gegenstandes Bauwerk aus Sicht der Entwurfsobjekte wurde

<sup>7</sup>diesbezüglich weiterführende Erläuterungen gibt Wasmer [Was97]

bereits in Abschnitt 3.1.2 unterstrichen. Das objektorientierte Paradigma bietet weiterhin Vorteile hinsichtlich der ebenfalls im vorangegangenen Abschnitt aufgeführten Abstraktionsmechanismen. Einerseits sind diese partiell bereits in das Paradigma integriert, andererseits lassen sich weitere Mechanismen (siehe z.B. [NBL93]) sehr gut durch die Konzepte des Paradigmas abbilden. Hannus und Karstila konstatieren [HKT95]:

*The object-oriented modelling paradigm has been widely accepted as a basic meta model since it allows using concepts close to those which human think. . . . It supports abstractions mechanism like classification, generalisation/specialisation and composition/decomposition. These concepts correspond to the real world things and their structural, functional etc. relationships.*

Ein weiteres Kriterium für die Anwendung des oo-Paradigmas ergibt sich aus der in den Bauwerksmodelldefinitionen geforderten computerverarbeitbaren Form der Modelle. In dieser Hinsicht stellt das oo-Paradigma auf Grund seiner breiten Akzeptanz und der sehr guten Unterstützung durch diverse Spezifikationen und entsprechender softwaretechnischer Applikationen die prädestinierte Basis dar. Es existieren eine Reihe von objektorientierten Modellierungs- und Programmiersprachen, sowie eine große Palette beide verbindender CASE<sup>8</sup>-Tools.

Aus dieser Begründung resultierend findet im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich das objektorientierte Paradigma zur Erstellung und Beschreibung des Bauwerksmodells Einsatz. Auf diesen Aspekt wird noch einmal in Abschnitt 3.4 eingegangen.

Als objektorientierte Modellierungssprache wird die UML<sup>9</sup> herangezogen. Zum einen stellt sie den aktuellen Standard auf diesem Gebiet dar und zum anderen sind sehr ausgereifte UML-unterstützende CASE-Tools verfügbar.

OO-PARADIGMA  
ALS MODELLIERUNGSKONZEPT

Für weitergehende Erläuterungen zur Spezifikation, den zugrundeliegenden Konzepten bzw. zur Verwendung und zum Einsatz des oo-Paradigmas wird auf die zahlreichen Publikationen auf diesem Gebiet verwiesen.

Allgemeine Informationen, die Objektorientierung betreffend, sind z.B. [MO92], [Gra94], [Boo94], [Vet95] zu entnehmen. Die Konzepte der UML und ihre Anwendungen werden ausführlich in folgenden Werken behandelt: [RJB99, UML-Reference Manual], [BRJ99, UML-User Guide], [FS97].

Vergleichende Untersuchungen verschiedener Modellierungssprachen wie NIAM<sup>10</sup>, IDEF1x<sup>11</sup> oder EXPRESS sind in den Literaturquellen [ACDB<sup>+</sup>98], [Eas99] zu finden.

---

<sup>8</sup>Computer Aided Software Engineering

<sup>9</sup>Unified Modelling Language

<sup>10</sup>Nijssen's Information Analysis Method [SLM01]

<sup>11</sup>Integration Definition for Information Modeling [Fed93]

Die speziell auf das Bauwesen und die Bauwerksmodellierung bezogene Anwendung objektorientierter Methoden und Techniken wird in folgenden Arbeiten sehr gut dargelegt: [Rüp93], [Ste97], [Olb98], [Eas99]. An dieser Stelle ganz besonders hervorzuheben sind die Ergebnisse des DFG<sup>12</sup>-Schwerpunktprogramms „Objektorientierte Modellierung in Planung und Konstruktion“ [Har00].

Als Konsequenz des im Rahmen dieser Arbeit geforderten Einsatzes der Objektorientierung als Modellierungsparadigma kann an dieser Stelle bereits eine erste Verfeinerung der Bauwerksmodelldefinition nach Björk (s. Abschnitt 3.1.1) vorgenommen werden. Für den Kontext dieser Arbeit gilt nunmehr:

**Bauwerksmodell** Das digitale Bauwerksmodell repräsentiert den *universe of discourse* - Bauwerk, basierend auf einem objektorientiert modellierten konzeptuellen Schema, welches die erforderliche lebenszyklusweite Datengsamtheit strukturiert beschreibt.

**Bauwerksmodelldaten** Die Bauwerksmodelldaten prägen (instanziierten) entsprechend dem konzeptuellen Schema des Bauwerksmodells ein konkretes Bauwerk im Sinne eines rechnerinternen VIRTUELLEN BAUWERKS aus (s. Abbildung 3.5).

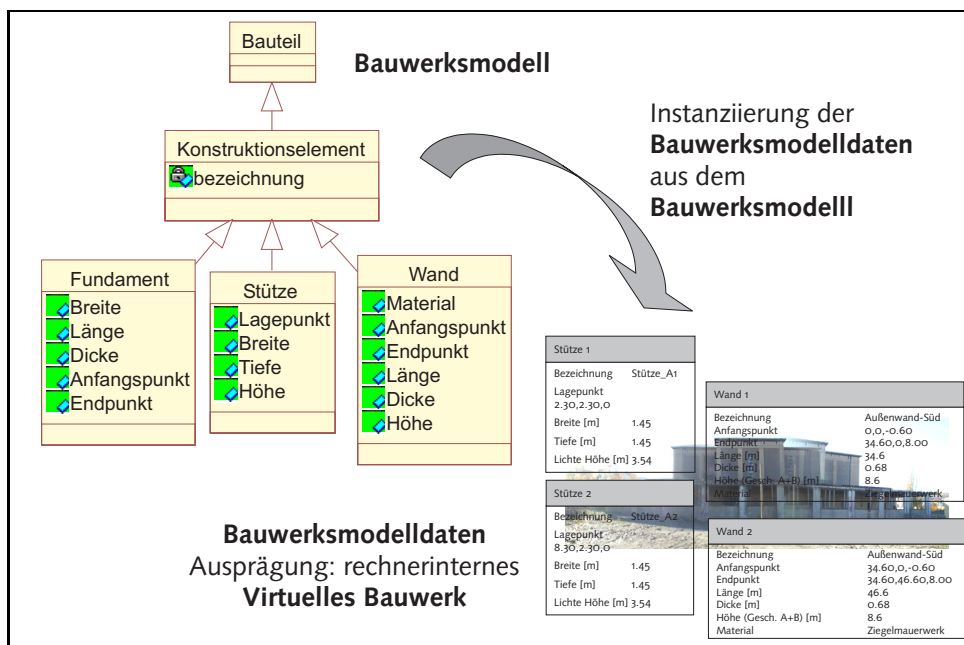


Abbildung 3.5: Zusammenhang: Bauwerksmodell und -daten

<sup>12</sup>Deutsche Forschungsgemeinschaft

### 3.1.3 Historische Entwicklung von Bauwerksmodellen

Die Geschichte der Bauwerksmodelle begann im wesentlichen mit der Entwicklung erster CAD-basierter Systeme in den frühen 60er-Jahren, gefolgt von ersten integrierenden Bauwerksentwurfssystemen, deren Ziel hauptsächlich darin bestand, den Entwurfprozeß durch die Definition und Analyse verschiedener Entwurfskomponenten und deren Kompositionen zu verbessern. Bedeutende Projekte dieser Epoche sind: das System OXSYS CAD aus Großbritannien und die Systeme BDS, GLIDE und GLIDE II aus den USA. Sehr detaillierte Informationen hierzu können [Eas99] und [Bjö95] entnommen werden.

Diesen Ansätzen folgten zu Beginn der 80er-Jahre verstärkt Versuche wissensbasierte Methoden der Künstlichen Intelligenz in Form von Expertensystemen und -shells zu etablieren. Als wesentlicher Vertreter dieser Kategorie sei das IBDE-Projekt [FFH<sup>+</sup>94] erwähnt. Besonders die logische Programmiersprache PROLOG fand hierbei vielfältig Anwendung. Mitte bis Ende dieses Jahrzehnts setzten sich (zumindest in der Forschung) zunehmend die gerade aus diesen Ansätzen der Künstlichen Intelligenz stammenden Methoden der objektorientierten Modellierung und Programmierung durch.

Zu dieser Zeit und unter Zuhilfenahme der entstandenen Modellierungstechniken wie IDEF1x und NIAM entstanden die ersten Generationen von Gebäudemodellen. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind das GARM<sup>13</sup>-Modell [Gie88], das Building-System-Modell [Tur90] und das RATAS-Modell [Bjö92].

Inspiriert und gefördert durch die z.T. eben aufgeführten Forschungsprojekte starteten parallel erste Standardisierungsbemühungen im Rahmen der STEP<sup>14</sup>-Initiative (der vollständige Name des Standards lautet: *ISO 10303 - Industrial Automation Systems - Product Data Representation and Exchange*). Ein wesentlicher Aspekt hierbei war die Schaffung der Modellierungssprache EXPRESS, welche sich zur Beschreibung der konzeptuellen Schemata gegenüber IDEF1x und NIAM durchsetzte und gerade auf dem Gebiet der rein deskriptiven Modellierung bis heute noch breite Anwendung findet.

Anfang der 90er-Jahre wurden erstmals Aspekte hinsichtlich der Anwendbarkeit und Handhabbarkeit umfassender lebenszyklusbetrachtender Bauwerks- oder Gebäudemodelle aufgegriffen und diskutiert. Diese Situation kommentieren Junge und Liebich folgendermaßen [JL97]:

*This open discussion leads directly to the question how a building product data model that would cover the needs of all parties involved in the process of design, construction, maintenance and management has to be structured. Today the belief that there is no way leading to a homogeneous single central building product model is accepted nearly unanimously.*

---

<sup>13</sup>General AEC Reference Model

<sup>14</sup>ISO 10303 - TC184 SC4

Die folgenden Projekte Mitte der 90er-Jahre begannen ein umfassendes Bauwerksmodell aus verschiedenen Teilmodellen (Partialmodellen) zu konstituieren. Die bedeutendsten Vertreter hierunter sind die ESPRIT-Projekte ATLAS [TP95] und COMBI [Sch95a]. Aus dem deutschsprachigen Raum seien zu dieser Kategorie von Projekten das Objektorientierte Modellmanagement-System (OOMM) [Rüp93], das ARMILLA-Projekt [HH99] und das Modell PLAKON des Systems INDUSYS [Bre98] genannt.

Die Verbindung bzw. Integration der sich entwickelnden Teilmodelle sollte über sogenannte (zentrale) Kernmodelle<sup>15</sup> realisiert werden. Die Entwicklung neutraler Kernmodelle warf die existentielle Frage nach dem Inhalt bzw. dem Fokus derartiger Modelle auf. Diese (in Abschnitt 3.2.2 detaillierter dargestellte) Problematik wird bis heute kontrovers diskutiert und blieb bislang in abschließender Form unbeantwortet.

Die zu dieser Zeit parallel initiierten (EU-geförderten) COMBINE-Projekte<sup>16</sup> [DFVA95], [Aug95] fokussierten nicht direkt auf die Erforschung neuer (IT) Verfahren und Methoden auf diesem Gebiet, sondern zielten auf eine praktische Demonstration des Potentials der Bauwerksmodellierung und ihrer integrierenden Möglichkeiten ab.

Ebenfalls Mitte der 90er-Jahre wurde die IAI mit der Vision: *To enable software interoperability in the AEC/FM industry* und der Mission: *To define, promote and publish a specification for sharing data throughout the project life cycle, globally, across disciplines and across technical applications*. [WS99] gegründet. Die Industry Foundation Classes (IFC) stellen diese Spezifikation dar, deren Präsenz sich besonders auf Grund des Einflusses und der breiten Unterstützung verschiedener Software-Hersteller (z.B. AutoDesk) zunehmend verstärkt.

Den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Bauwerksmodellverwaltung bzw. der darauf aufbauenden Integration der Planungsbeteiligten repräsentieren die Ende der 90-er Jahre gelaufenen ESPRIT-Projekte TOCEE [KH98] und das COMBI-Folgeprojekt VEGA [BKR<sup>+</sup>98]. Die Hauptintensionen dieser Projekte waren nicht mehr auf die Schaffung neuer Bauwerksmodellspezifikationen gerichtet. Primäres Interesse dieser Projekte war die Integration aller Planungsbeteiligten und die Unterstützung der Kooperation und Kommunikation durch die Anwendung von Groupware- und Concurrent Engineering-Techniken. Bei den zugrundeliegenden Bauwerksmodellen wurde prinzipiell von den Standardisierungsbemühungen STEP oder IAI/IFC Gebrauch gemacht.

Auf die konkreten Ausrichtungen, Ziele und Ergebnisse der einzelnen Projekte soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Diese Informationen können in den zu den Projekten angegebenen Quellen und zusammenfassend (auch die historische Entwicklung betreffend) sehr ausführlich und instruktiv in folgenden Publikationen nachgelesen werden: [Bjö95], [Eas99] [JL97].

---

<sup>15</sup>auch core model oder neutral model

<sup>16</sup>COMBINE 1990-1992 und COMBINE II 1992-1995



### 3.1.4 Standardisierungsbemühungen (STEP/IFC)

Im Rahmen der fachlichen Spezifikation von Bauwerksmodellen reflektieren derzeit die Standardisierungsbemühungen STEP, IFC und CIMSteel den aktuellen Entwicklungsstand. Aus diesem Grund soll auf diese Ansätze im folgenden eingegangen werden.

#### ISO 10303-STEP

Die Bemühungen zur Schaffung eines unabhängigen Produktdatenaustauschformates entstanden primär aus der Erkenntnis, daß die verfügbaren Austauschformate wie IGES oder DXF in ihrer Konzeption nicht korrigierbare Schwächen aufwiesen (s. Abschnitt 3.1). Derartige Initiativen entstanden parallel in den USA (unter dem Namen PDES<sup>17</sup>) und in verschiedenen Ländern Europas (SET in Frankreich und CAD\*I in Deutschland). 1991 wurden diese Bemühungen im Rahmen des STEP-Standards mit folgenden Zielstellungen zusammengeführt [Eas99]:

- Einbeziehung neuer Programmiersprachkonzepte (speziell der Objektorientierung)
- Zusammenführung verschiedener definierter formaler Spezifikationen unter Verwendung neuentwickelter Modellierungssprachen
- Separierung der Datenmodelle von physikalischen Dateiformaten
- Unterstützung von Teilmodellen zur Integration verschiedener Applikationsklassen mit der Möglichkeit des Ausschlusses von Daten (-modellteilen)
- Unterstützung alternativer Implementationslevel
- Einarbeitung allgemeiner Referenzmodelle als gemeinsame Untermenge großer Standardmodelle

Zur Erreichung dieser Ziele wurde eine 5-Ebenenarchitektur entwickelt (s. Abbildung 3.6), deren Inhalte kurz dargestellt werden.

**description methods** Hierzu zählen verschiedene unterstützte Modellierungssprachen (IDEF1x, NIAM, EXPRESS und EXPRESS-G)

**integrated resources** Dieser Ebene werden die bereits erwähnten allgemeinen Referenzmodelle zugeordnet. Domänenübergreifende Referenzmodelle werden *generic integrated resources* genannt und beinhalten z.B. Spezifikationen die Geometrie, das Material oder das Projekt betreffend.

---

<sup>17</sup>Product Data Exchange Standard

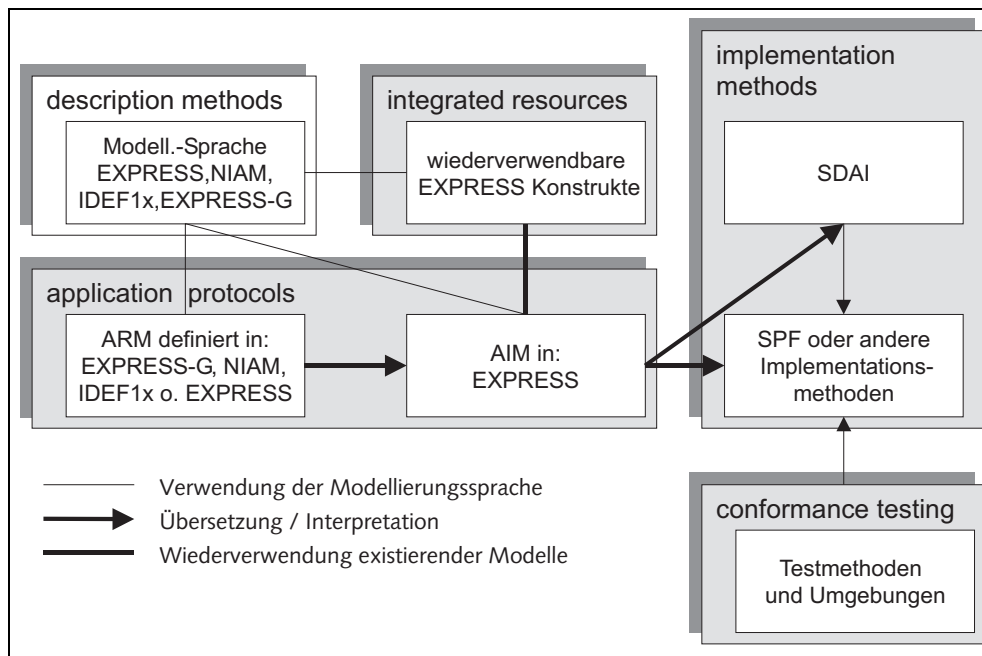


Abbildung 3.6: STEP-Architektur nach Eastman [Eas99]

**application protocols (APs)** Die Applikationsprotokolle werden unter Verwendung der verfügbaren Modellierungssprachen und der Referenzmodelle für spezielle Applikationsdomänen entwickelt. Hierbei wird zunächst ein ARM (*Application Reference Model* - vom Nutzer bzw. Entwickler lesbare Anforderungsbeschreibung) spezifiziert und anschließend aus diesem ein AIM (*Application interpreted model* - Beschreibung in computerverarbeitbarer Form) abgeleitet.

**implementation method** Dem Applikationsprotokoll wird eine Implementationsmethode zur Seite gestellt, welche die Basis für eine STEP-Implementation (programmtechnische Verwendung der spezifizierten APs) darstellt. Beispiele hierfür sind das *STEP (Part 21) physical file* (SPF) und das *Standard Data Access Interface* (SDAI).

**conformance testing** Jedes AP und dessen Implementierung muß auf Konformität, d.h. auf Übereinstimmung der Implementation in Bezug auf die zugrundeliegenden Modelle ARM und AIM getestet werden.

Die im Fokus der Integration größte Bedeutung weisen die *integrated resources* auf. Sie stellen die Verbindung zwischen den einzelnen Applikationsdomänen im Sinne redundanzfreier Kernmodelle dar. Aus diesem Grund sollen die wesentlichsten Vertreter kurz benannt sein.

**application context (Part 041)** In diesem Modell werden Daten zur Projektspezifik wie Organisation, Managementstrukturen, Sicherheitsaspekte, Standardeinheiten u.ä. spezifiziert.

**representation structures (Part 043)** In dieser Ressource werden verschiedene Repräsentationsformen und deren Beziehungen untereinander festgelegt.

**geometric and topological representations (Part 042)** Dieses Modell zielt auf eine gemeinsame Basis für die geometrisch-topologische Darstellung der spezifizierten Objekte ab. Zu diesem Zweck werden verschiedene Geometriemodelle wie CSG<sup>18</sup> oder BRep<sup>19</sup> basierend auf definierten Koordinatensystemen und weiteren geometrischen Elementen (Punkte, Kurven etc.) nachgebildet.

## CIMSteel

Das CIMsteel-Projekt wurde initiiert, um eine Verbesserung der Effektivität und Effizienz der Europäischen Stahlbauindustrie zu erreichen. Im Vordergrund stehen hierbei die Harmonisierung der Normen und Spezifikationen, um eine reibungslose Integration von CIM-Techniken für den Entwurf, die Analyse, die Detaillierung, die Fabrikation und die Errichtung von Stahlkonstruktionen zu ermöglichen. CIMSteel ist kein STEP-gegenläufiger Ansatz, sondern wird als STEP-konformes Applikationsprotokoll (Part 230) entwickelt. In diesem Zusammenhang seien auch die Bemühungen des Deutschen Stahlbauverbandes (DSTV) erwähnt, welcher mit der „Standardbeschreibung Produktschnittstelle Stahlbau“ eine parallele Zielstellung verfolgt [Hal94] [HKOS96]. Detaillierte Informationen zu diesen Schnittstellenbeschreibungen und entsprechenden Projekten (z.B. zum MIKO<sup>20</sup>-Projekt) können [HOS95], [TWWG97], [GKP<sup>+</sup>97] und [KFH00] entnommen werden.

Die bis hierher aufgeführten Standardisierungsbemühungen verbindet die Tatsache, daß ihre gemeinsame Zielstellung in der Unterstützung des Datenaustausches zwischen verschiedenen involvierten Applikationen (auch diverser Applikationsdomänen) liegt. Primäres Ziel ist also die Spezifikation und Bereitstellung eines neutralen Datenaustauschformates, welches durch die Implementationsmethoden SPF und SDAI unterstützt wird.

---

<sup>18</sup>Constructive Solid Geometry

<sup>19</sup>Boundary Representation

<sup>20</sup>Management- und Informationssystem für den Komplettbau

## Industry Foundation Classes

Einen tatsächlichen Ansatz zur Schaffung eines integrierten Bauwerksmodells stellen die mittels EXPRESS oder IDL<sup>21</sup> spezifizierten IFC der IAI dar. Die IFC-

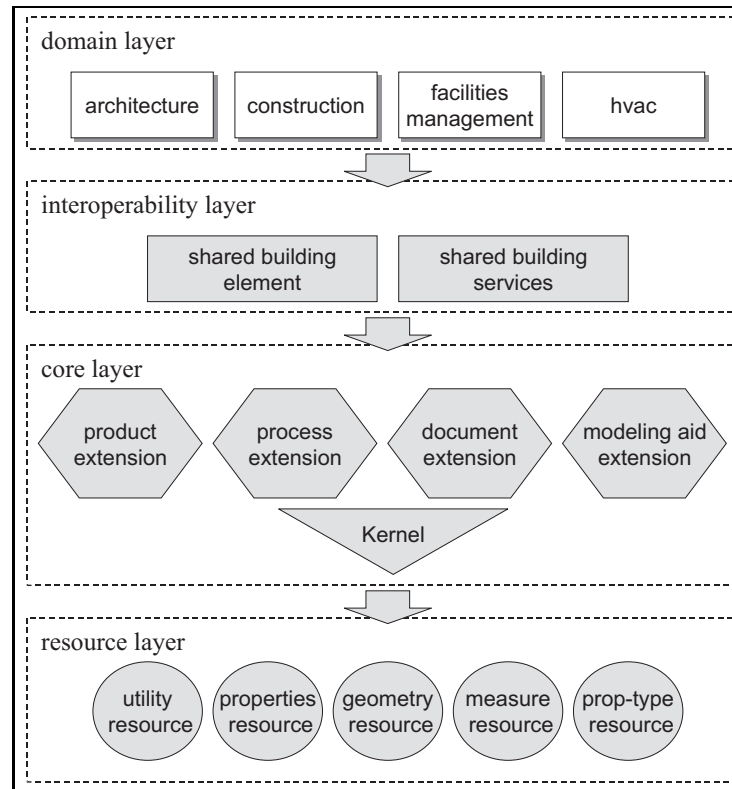


Abbildung 3.7: IFC-Architektur nach Eastman [Eas99]

Architektur folgt einer STEP-ähnlichen 4-stufigen Hierarchie (s. Abbildung 3.7), deren Ebenen im folgenden kurz detailliert werden:

**resource layer** Diese unterste Ebene bietet allgemeingültige, durch alle folgenden Ebenen zu verwendende Ressourcen wie etwa Geometrie, Projekteigenschaften etc. Diese Ressourcen entsprechen prinzipiell den *integrated resources* des STEP-Standards (die *measure-resource* wurde beispielsweise komplett von STEP übernommen).

**core layer** Dieser Layer beschreibt abstrakte generische Konzepte (z.B. Wände und Räume in der *product extension*), welche in den höheren Ebenen verwendet werden.

**interoperability layer** Hier werden Objekte definiert, die in mehreren Applikationen verwendet werden.

<sup>21</sup>interface definition language der OMG (Object Management Group)

**domain layer** Diese applikationsspezifische Schicht soll die verschiedenen durch die Fachplaner eingesetzten Applikationen unterstützen.

Weitergehende Informationen zu den IFC können den Dokumentationen zu den Spezifikationen [WS99] und einer Reihe sekundärer Literaturquellen, wie z.B. [Eas99] [JL98], [FAA<sup>+</sup>98], [LW98] und [WL98] entnommen werden. Der Einsatz der IFC in verschiedenen Forschungsvorhaben wird beispielsweise in folgenden Publikationen dokumentiert [DMBB98], [NLE00], [HFV00].

Die Industry Foundation Classes stellen im Gegensatz zu STEP ein semantisch hochwertiges Rahmenwerk zur Integration einer Menge entsprechend unterstützter Applikationen im Bereich des Bauwesens dar, wobei bis jetzt im wesentlichen die Belange Architektur (Neubau) und Facility Management ausreichend abgedeckt werden. Für einen bauwerkslebenszyklusumfassenden Integrationsansatz im Sinne eines durchgängigen Datenaustausches scheint das Konzept der STEP Applikationsprotokolle basierend auf den *generic integrated resources* jedoch tragfähiger.

Beiden Ansätzen gemeinsam bleibt jedoch der entscheidende Nachteil der extremen Komplexität der Spezifikationen, was eine Anwendung und die damit verbundene notwendige Implementierung der Standards äußerst schwierig gestaltet. Trotz des schon erreichten sehr hohen Komplexitätsgrades dieser Standards (gemessen in der Anzahl der Klassen, Attribute und Relationen), sind bisher nur Ausschnitte der im Rahmen des Lebenszyklusses von Bauwerken benötigten Daten in die verschiedenen Layer der Standards integriert. Daraus folgt eine andauernde Erweiterung und Anpassung der Datenstrukturen und ein damit einhergehender ständiger Versions-Wechsel (die IAI verabschiedet jährlich eine neue IFC-Version), der das Problem der Implementierung der Standards zusätzlich verschärft.

Aus oben genannten Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit von einer Verwendung dieser Standards als grundlegend zu verfolgender Integrationsansatz abgesehen.

## 3.2 Logische Bauwerksmodellarchitektur

Wie im letzten Abschnitt noch einmal im Rahmen der Betrachtung der Standardisierungsbemühungen dokumentiert wurde, besteht das Hauptproblem der lebenszyklusumfassenden Bauwerksmodellierung in der Komplexität, d.h. in der Menge der zu betrachtenden, vielfältigste Eigenschaften besitzenden Entwurfsobjekte und der zwischen diesen existierenden Vielzahl von Beziehungen. Diesbezüglich wurde in Abschnitt 3.1.2 eine erste notwendige Maßnahme der Komplexitätsverminderung auf der Basis von Abstraktionsmechanismen diskutiert. Auf

den ebenfalls an dieser Stelle (Abschnitt 3.1.2) bereits verwiesenen zweiten komplexitätsreduzierenden Ansatz der Teilmodellbildung soll nun näher eingegangen werden.

### 3.2.1 Partialmodelle und ihre Kohärenz

Die Abschnitte im Lebenszyklus eines Bauwerkes vom Entwurf über die Konstruktion, Errichtung, Erhaltung, (Um-)Nutzung bis hin zum Rückbau und hierbei ganz speziell die planerischen Phasen sind durch eine Vielzahl involvierter Entscheidungsprozesse gekennzeichnet, die eine enorme Anzahl diverser Daten zur Beschreibung aller Aspekte des Bauwerkes erfordern. Die an den jeweiligen Entscheidungsprozessen Partizipierenden benötigen jedoch überdies zusätzliche Daten und Informationen (wie: Normen, Bauteilkataloge u.ä.), welche nicht der direkten Beschreibung des Bauwerkes dienen oder die keinen prozeßübergreifenden Charakter tragen. Diese Daten sind also nur für bestimmte phasen- bzw. domänenspezifische Prozesse relevant. Aber auch die prozeß- bzw. domänenübergreifend relevanten Daten werden von den Beteiligten und deren Fachapplikationen in den jeweiligen Prozessen differenziert verstanden bzw. betrachtet. Diese Problematik verbunden mit der ohnehin extremen Anzahl verschiedener Daten machen die Definition eines globalen allumfassenden Bauwerksmodells unmöglich. Junge und Liebich [JL95] verweisen auf verschiedene internationale Forschungsvorhaben (s. auch Abschnitt 3.1.3) und erklären:

*... the task of defining a building product model that would cope with the needs of all parties involved. It is the belief of nearly all researchers that such a task is indeed impossible. Recently, a number of projects have proposed more realistic approaches. They all aim at dividing the entire model into smaller parts.*

Auch im Kontext dieser Arbeit wird die Zerlegung des Bauwerksmodells als zur Komplexitätsreduktion zweckdienlich angesehen und entsprechend eingesetzt. Die resultierenden Bauwerksmodellteile werden als Partialmodelle bezeichnet und folgendermaßen definiert:

PARTIAL-  
MODELLBILDUNG  
ZUR KOMPLE-  
XITÄTS-  
REDUKTION

**Partialmodell** Ein Partialmodell spezifiziert ein phasen- bzw. disziplinspezifisches objektorientiertes konzeptuelles Schema, demnach eine abgeschlossene Menge von Objektbeschreibungen<sup>22</sup> und deren Relationen untereinander als Teilmenge des Bauwerksmodells. Die Objektmengen der Partialmodelle sind nicht notwendigerweise disjunkt bzw. redundanzfrei.

Ein derartig aufgefaßtes Partialmodell beschreibt die entwurfs- bzw. lebenszyklusphasenspezifischen Daten und Informationen, welche die Grundlage der Prozeßbearbeitung innerhalb der durch das Partialmodell reflektierten Sicht bzw. des

<sup>22</sup>Klassen im objektorientierten Sinn

Abschnittes darstellen. Dementsprechend bildet beispielsweise ein Partialmodell TRAGWERK (s. Abbildung 3.8) die Basis zur Erstellung eines statischen Modells aus einem gegebenen architektonischen Modell [Rüp93]. Wie bereits ausführlich

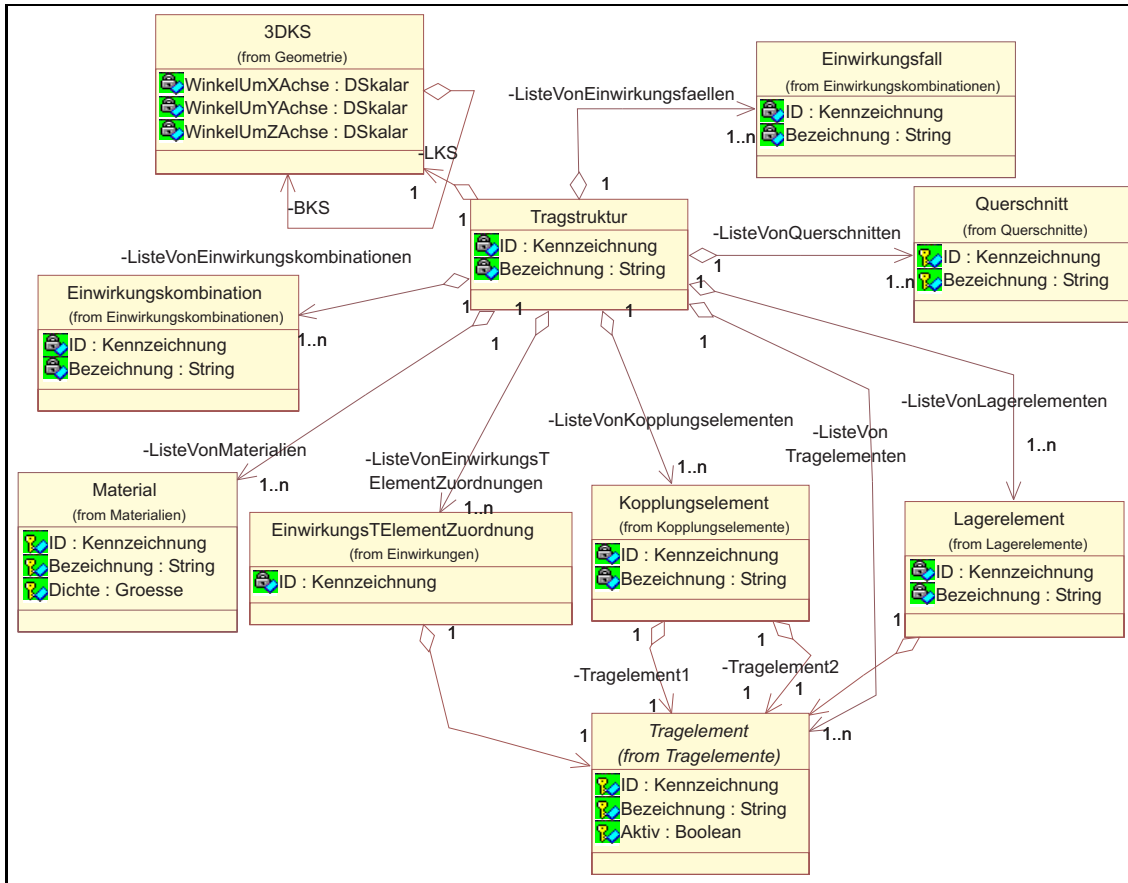


Abbildung 3.8: Ausschnitt eines Partialmodells TRAGWERK [BFW01]

in Abschnitt 2.1.2 dargelegt und eingangs dieses Abschnittes noch einmal betont, benötigen die beteiligten Fachplaner zur Erledigung der ihnen obliegenden Tätigkeiten Daten und Informationen aus Prozessen verschiedener anderer Phasen und Abschnitte, d.h. aus diversen anderen Partialmodellen. Diese Kohärenz muß im Fall der Bauwerksmodellzerlegung in Teilmodelle als explizites Beziehungsgefüge nachgebildet werden [WH00]. Diese explizit zu definierenden Beziehungen zwischen Partialmodellen bilden einen wesentlichen Forschungsansatz dieser Arbeit und werden deshalb in Abschnitt 4 detailliert untersucht.

KOHÄRENZ  
DETERMINIERT  
DURCH TEIL-  
MODELLÜBER-  
GREIFENDE  
INFORMATIONEN-  
BEDÜRFNISSE

Die Notwendigkeit der Partialmodellzerlegung zur Konzeption und Spezifikation von lebenszyklusbetrachtenden Bauwerksmodellen akzeptierend und auf die bisherige Arbeitsdefinition BAUWERKSMODELL anwendend, kann nun eine weitere Detaillierung der Bauwerksmodelldefinition (im Sinne der Basis der Datenintegration) erfolgen:

**Bauwerksmodell** Das Bauwerksmodell konstituiert sich aus der Menge der involvierten Partialmodelle inklusive des zwischen diesen existierenden expliziten Beziehungsgefüges.

Die Definition für Partialmodelle einbeziehend, können nun verschiedene Ansätze zur logischen Strukturierung von Bauwerksmodellen demonstriert und bewertet werden.

### 3.2.2 Resultierende Bauwerksmodellabbildungen

Prinzipiell lassen sich drei grundsätzlich verschiedene Gesamtmodellarchitekturen zur Etablierung einer Datenintegrationsebene identifizieren [WH00].

#### Zentraler Modellansatz

Dieser erste Modellansatz (s. Abbildung 3.9) fokussiert auf die Erstellung und Verwendung eines zentralen und allumfassenden Bauwerksmodells, welches durch die Vereinigung aller relevanten Daten und Informationen im Lebenszyklus eines Bauwerkes allen Partizipierenden als Daten- und Informationsaustauschbasis und damit als Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung dient. Dem Aspekt der

**Bauwerksmodell-  
struktur (2):**  
AUFBAUBEZO-  
GENE  
ANFORDE-  
RUNGEN  
(ARCHITEK-  
TUR)

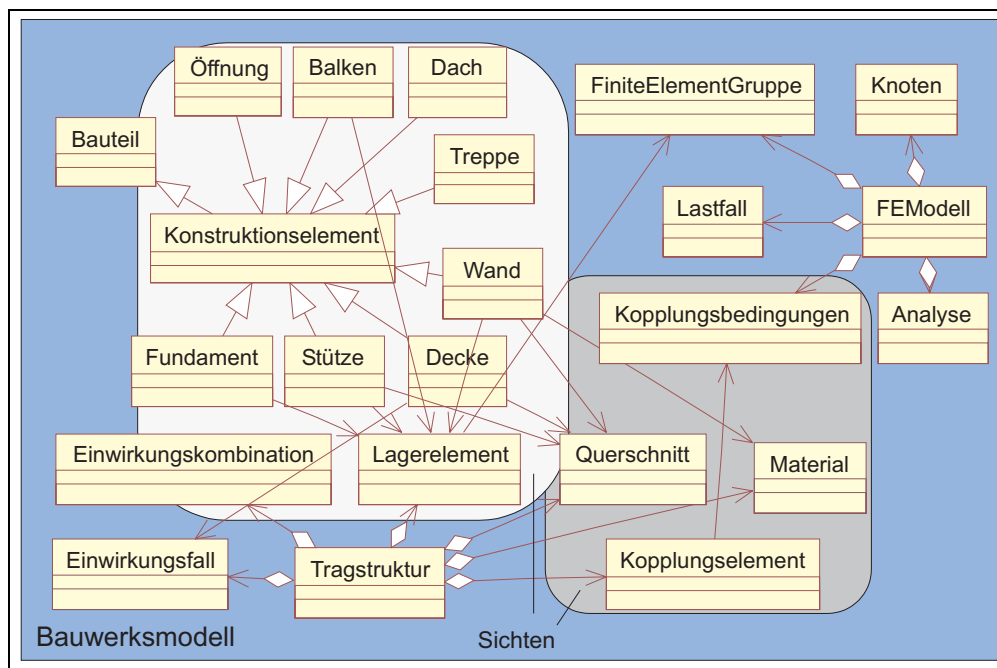


Abbildung 3.9: Zentraler Modellansatz

differierenden Semantik und Verwendung von Entwurfsobjekten innerhalb unterschiedlicher Prozesse und damit der Kooperation der Beteiligten wird durch ein



notwendiges Sichtenkonzept Rechnung getragen. Diesen Sichten eines Beteiligten, einer Applikation oder eines bestimmten Prozesses (Aktivität) werden durch Filtermechanismen für sie spezifische relevante Aspekte des Modells bzw. entsprechender Entwurfsobjekte zugeordnet.

Die Vorteile dieses Ansatzes liegen:

- in der Konsistenzsicherung der Daten
- der Versionierung der Daten
- im Zwang zur Kommunikation und Kooperation.

Als Nachteile können die:

- extrem hohe Komplexität des Bauwerksmodells (nicht handhabbar)
- Notwendigkeit der zusätzlichen Sichtenbildung und -verwaltung
- extrem aufwendigen Modellerweiterungen

angesehen werden. Auf Grund der nicht beherrschbaren Komplexität eines globalen allumfassenden Bauwerksmodells wird dieser Ansatz in den weiteren Betrachtungen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

### **Dezentraler Modellansatz**

Der dezentrale Modellansatz (s. Abbildung 3.10) folgt einer konsequenten Zerlegung der zu modellierenden Datengesamtheit in Partialmodelle. Zur Verwendung dieser Grundarchitektur im Sinne eines integrierenden Bauwerksmodells, d.h. zur Realisierung eines prozeßübergreifenden Datenaustausches bzw. -zugriffs, muß die Kohärenz der Teilmodelle über partialmodellspezifische Schnittstellen zwischen den Teilmodellen abgebildet werden.

Vorteile weist dieser Ansatz im Bereich der:

- Definition der Partialmodelle (wesentlich geringere Komplexität)
- Erweiterbarkeit um weitere Partialmodelle (relativ unproblematisch)

auf. Dieser Ansatz ist jedoch von einer Reihe gravierender Nachteile hinsichtlich der Integration betroffen:

- integrativer Charakter kaum vorhanden
- wenig Konsistenzsicherungsmöglichkeiten
- Versionierung eines „Gesamtdatenbestandes“ problematisch
- kaum Koordinationsmöglichkeiten.

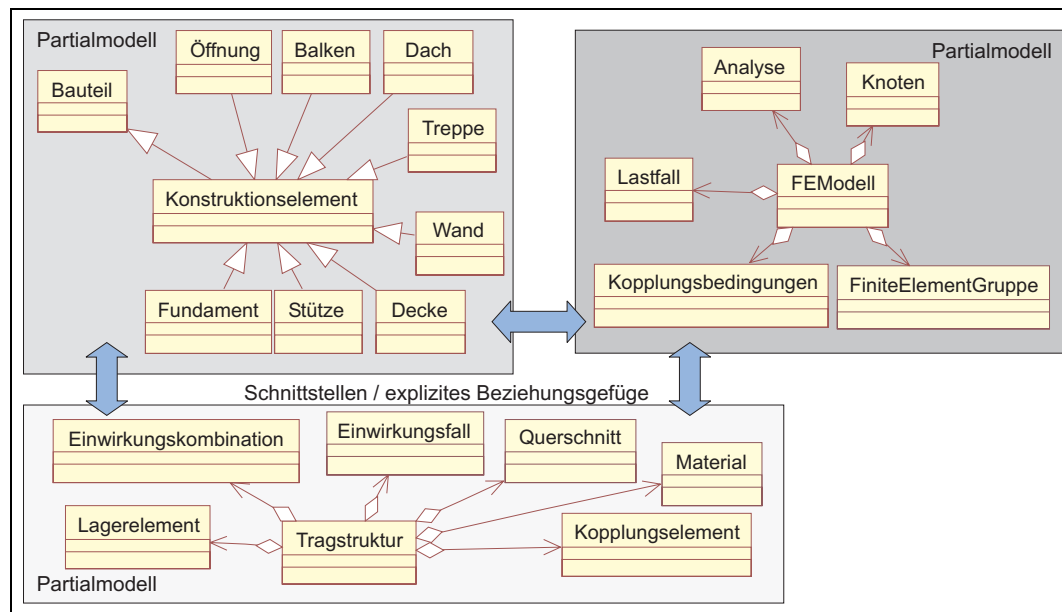


Abbildung 3.10: Dezentraler Modellansatz

Dieser Ansatz entspricht der reinen Verwendung der in STEP und in den IFC vorgeschlagenen *application protocols* bzw. *domain layer* ohne die jeweils darunter liegenden Schichten.

Gerade vor dem Hintergrund des Anliegens dieser Arbeit, die Kooperation und Kommunikation der Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus effizient auf Basis einer Integrationsplattform zu unterstützen, kann dieser Ansatz für den Kontext der Arbeit nicht weiter in Betracht gezogen werden.

### Hybrider Modellansatz

Die dritte zu untersuchende Architekturvariante eines Bauwerksmodells stellt der hybride Bauwerksmodellansatz dar. Wie der Name bereits verdeutlicht, handelt es sich hierbei um eine Mischform aus zentralem und dezentralem Ansatz. Ziel dieser Architektur ist es, jeweils die Vorteile der beiden genannten Modellansätze zu vereinigen und die Nachteile möglichst auszuschließen. Als Konsequenz dieser Handlung konstituiert sich der hybride Modellansatz aus einer Menge von Partialmodellen ergänzt um eine zentrale Modellkomponente. Die Partialmodellbildung zielt dabei auf die Komplexitätsreduktion bei der Modellspezifikation ab, während die zentrale Komponente zur Verbesserung der Koordinations- und Versionierungsmöglichkeiten und des integrativen Charakters des Ansatzes beiträgt. Die Abbildung 3.11 illustriert die logische Architektur des hybriden Ansatzes. Dieser Ansatz findet sowohl innerhalb des STEP-Standards als auch in den IFC Anwendung. Bei STEP bilden die *integrated resources* und bei den IFC die Schichten *interoperability*, *core* und *resource layer* ein derartiges Zentralmodell.

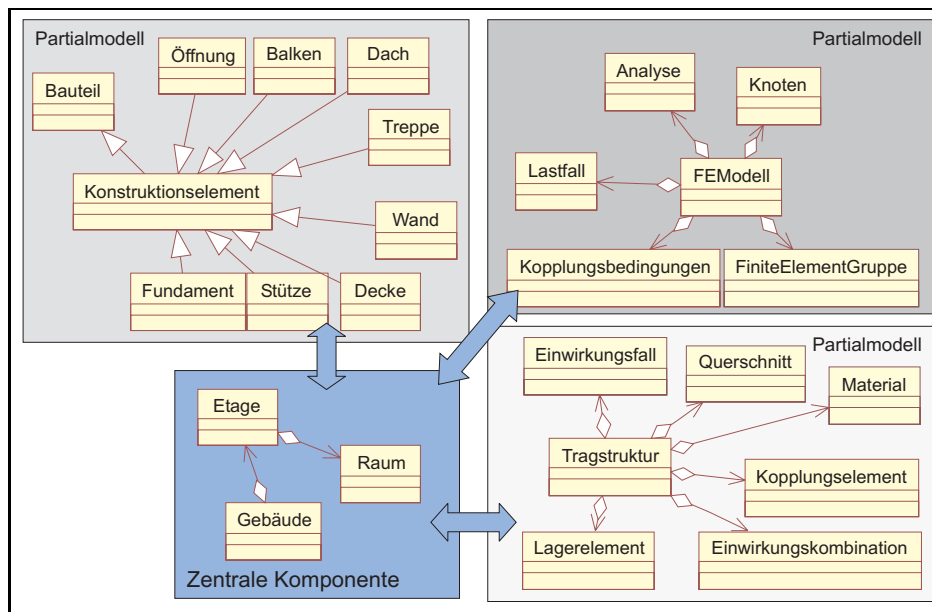


Abbildung 3.11: Hybrider Modellansatz

Demnach wird die Kohärenz der Teilmodelle über die Modellstrukturen der zentralen Komponente realisiert. Genau diese Aufgabe wirft die bereits in den Ausführungen zur historischen Entwicklung von Bauwerksmodellen (Abschnitt 3.1.3) diskutierte Frage nach dem Inhalt der zentralen Modellkomponente auf.

Ziel der zentralen Komponente ist es letztlich, die prozeß- und partialmodellübergreifend relevanten und benötigten Daten in adäquater Weise bereitzustellen und deren Konsistenz zu sichern. Dieser Zweck kann zum einen dadurch erreicht werden, daß alle Daten, die mindestens zwei Partialmodellen zugeordnet werden können, in das zentrale Modell aufgenommen werden. Dieses Vorgehen hat ein Explodieren des Zentralmodells bei hinreichend vielen Partialmodellen und der damit einhergehenden Datenmenge zur Folge. Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung generischer Ressourcen wie es in STEP oder den IFC exerziert wird, was die bereits bei der Diskussion dieser Standardisierungsbemühungen (s. Abschnitt 3.1.4) diskutierten Schwierigkeiten nach sich zieht.

Die Darstellung und Bewertung der oben genannten unterschiedlichen Modellarchitekturen läßt bereits auf eine im Rahmen dieser Arbeit präferierte Architektur schließen.

Die Unzulänglichkeiten des dezentralen Ansatzes in koordinativer und integrativer Hinsicht und die aus Gründen der Komplexität praktisch unlösbare Modellspezifikationsproblematik des zentralen Ansatzes führen zu dem Schluß, eine hybride Bauwerksmodellarchitektur für die in dieser Arbeit zu konzipierende und prototypisch zu implementierende Datenintegrationsebene eines IuK-Systems zu verwenden. Als zentrale kooperations- und kommunikationsunterstützende Ko-

**Ansatz:**  
HYBRIDE  
MODELLARCHI-  
TEKTUR ALS  
BASIS DER  
DATENINTE-  
GRATION

ordinierungseinheit wird spezifisch eine Zentralmodellauffassung vorgeschlagen, nämlich eine die Partialmodelle verknüpfende Navigationsebene, deren Funktionsweise und Spezifik in Abschnitt 4.6 eingehend diskutiert wird.

### 3.3 Anforderungen an Bauwerksmodelle

Die Realisierung einer Datenintegrationsebene als Basis eines IuK-Systems stellt ausgehend von der Spezifik der Bauprozesse und der involvierten Datengesamtheit im Lebenszyklus eines Bauwerkes (s. Abschnitt 2.2) spezielle Anforderungen an das zugrundeliegende Bauwerksmodell.

Gerade unter dem Aspekt der Etablierung eines digitalen Bauwerksmodells im Sinne eines rechnerinternen virtuellen Bauwerkes, welches jederzeit den aktuellen Entwicklungsstand bzw. Zustand des Bauwerkes aus den verschiedenen Sichten der Beteiligten reflektiert, lassen sich verschiedene Anforderungen an ein integrierendes Bauwerksmodell identifizieren. Diese werden im folgenden formuliert [Bjö89], [KK97], [HKT95] und deren Konsequenzen für den Rahmen dieser Arbeit entsprechend diskutiert.

**Bauwerksmodellstruktur (3):**  
LEISTUNGSBE-  
ZOGENE  
ANFOR-  
DERUNGEN  
(EIGENSCHAF-  
TEN)

Zunächst können Anforderungen benannt werden, welche speziell für ein Gesamtbauwerksmodell (allumfassend singulär oder als Summe verschiedener Partialmodelle) Bedeutung besitzen:

**Umfang - Vollständigkeit** Ein der oben beschriebenen Intention folgendes Bauwerksmodell muß alle das Bauwerk beschreibenden Daten und Informationen beinhalten. Als wesentlich ist hierbei anzumerken, daß der gesamte Lebenszyklus des Bauwerkes betrachtet wird und besonders alle zwischen den einzelnen Disziplinen und den zugeordneten Prozessen auszutauschenden Daten abgebildet und adäquat zur Verfügung gestellt werden.

**Allgemeingültigkeit** Ein Bauwerksmodell sollte so konzipiert und spezifiziert sein, daß eine Eignung zur Beschreibung generell beliebiger Bauwerkstypen und Bauweisen resultiert.

Zu den Anforderungen, welche für ein Bauwerksmodell in seiner Gesamtheit und auch für die Partialmodelle im einzelnen gelten, zählen folgende:

**Hard- und Softwareunabhängigkeit** Das Bauwerksmodell als rein logische Strukturierung und Abstrahierung der Bestandsinformationen muß vollständig von Implementations- oder etwa Datenbanktechniken entkoppelt sein. Die Modellierung des Bauwerksmodells darf nicht bestimmten Anforderungen verschiedener Hard- und Software untergeordnet werden. Dies würde die Nutzbarkeit der Modelle speziell unter dem Aspekt der unterschiedlichen Prozeßbeteiligten und deren differenzierten Systemumgebungen prinzipiell in Frage stellen und gegebenenfalls unmöglich machen.

**Redundanzfreiheit** Es ist prinzipiell von Vorteil, wenn ein spezielles Datum nur einmal im Bauwerksmodell vorkommt. Dies trägt ganz entscheidend zur Reduktion von Inkonsistenzen im Modell bei. Diese auf Partialmodelle bezogene dementsprechende Disjunktheit von Teilmodellen ist jedoch nicht in jedem Fall wünschenswert, da dies unter Umständen (z.B. durch Datenbank - Loggingmechanismen) ein paralleles Arbeiten verhindert und demzufolge speziell im Sinne kooperativer Arbeit Ineffizienz in den Arbeitsabläufen bewirkt.

**Effizienz** Bei der Modellierung eines Bauwerksmodells sollte auf eine hohe Effizienz des Modells geachtet werden. Dementsprechend sollte das Modell möglichst kompakt und übersichtlich sein, um die Verwendung zu vereinfachen und die Fehleranfälligkeit zu minimieren. Ein demgegenüber konträres Effizienzkriterium stellt die Verarbeitungsgeschwindigkeit dar, welche durch redundante Informationen verbessert werden kann, da hierdurch z.B. regelbasierte Wertermittlungen vermieden werden können. Ziel der Modellierung an dieser Stelle muß ein gut ausbalancierter Kompromiß zwischen Geschwindigkeit und Redundanzvermeidung sein.

**Flexibilität** Aufgrund der variierenden nicht vorhersagbaren Datenerfordernisse der jeweiligen Beteiligten und deren Applikationen muß das Bauwerksmodell flexibel an bestimmte, dem jeweiligen Einsatz des Bauwerksmodell geschuldete Rahmenbedingungen anpaßbar sein. Speziell im Bezug auf:

- die Sicht der verschiedenen Applikationen
- den erforderlichen Implementationsaufwand
- Detaillierungslevel, wie Spezialisierung und Dekomposition
- die Verwendung standardisierter Datenbeschreibungen

muß ein Bauwerksmodell eine hohe Flexibilität aufweisen, um die Akzeptanz und Verwendung des Bauwerksmodells zu garantieren bzw. überhaupt erst zu ermöglichen.

**Erweiterbarkeit** *Since not all information about entities can be standardised in advance, and new data exchange needs emerge continuously, the user should be able to define new attributes and relationships* [HKT95]. Dieser Aussage zufolge ist es unmöglich, gerade lebenszyklusbetrachtende Modelle komplett vorzudefinieren, woraus die Notwendigkeit der Erweiterung des Bauwerksmodells um speziell benötigte Modellstrukturen folgt.

Aus den eben beschriebenen Anforderungen, welche zum Zeitpunkt der Modellspezifikation diametrale und partiell unrealistische Zielstellungen reflektieren, können für den in dieser Arbeit präferierten Ansatz der Schaffung eines Bauwerksmodells basierend auf verschiedenen Partialmodellen wesentliche Konsequenzen konkretisiert werden.

**Konsequenzen  
AUS ANFORDE-  
RUNGEN**

- Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 herausgestellt wurde ist es unmöglich, ein, wie in den Anforderungen nach Vollständigkeit und Allgemeingültigkeit verlangt, komplettes Bauwerksmodell für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes (zudem unter der Annahme es sei gültig für sämtliche Bauwerkstypen und Bauweisen) zu spezifizieren. Speziell aus den Forderungen nach Flexibilität und Erweiterbarkeit wird deutlich, daß sich die Komplexität der Bauwerksmodellspezifikation beispielsweise durch Partialmodellbildung reduziert, daß aber auch dadurch das prinzipielle Problem der Nichtdeterminiertheit der Datenerfordernisse an das Bauwerksmodell nicht gelöst werden kann. Dieses Problem kann nur durch eine laufzeitdynamische Modelladaption bzw. Modifikation [Ste97] zur Integration aller benötigten Daten überwunden werden (s. Abschnitt 3.4). **laufzeit-dynamische Modell-adaption**
- Aus der Forderung nach Flexibilität und Redundanzfreiheit resultiert eine weitere entscheidende Annahme für die Struktur des Bauwerksmodells im vorliegenden Kontext. Unter Beachtung von implementations- und applikationsspezifischen Kriterien und unter der Maßgabe größtmöglicher Komplexitätsreduzierung wird sich ein Bauwerksmodell immer nur aus den aktuell absolut erforderlichen Partialmodellen konstituieren. Anders formuliert bedeutet dies, daß die Anzahl der das Bauwerksmodell bildenden Partialmodelle dynamisch im Laufe des Lebenszyklusses eines Bauwerkes variiert. **dynamisch variierende Partialmodell-anzahl**
- Die Anforderung nach Hard- und Softwareunabhängigkeit wirkt sich gerade unter dem Aspekt der Laufzeitdynamik der Partialmodelle auf die Bauwerksmodellverwaltung aus, worauf in Abschnitt 3.4.2 detaillierter eingegangen wird. **spezifische Modell-verwaltung**
- Die Forderungen nach Effizienz und Redundanzfreiheit unterstreichen die Variationsmöglichkeiten gerade der Partialmodelle entsprechend des Zwecks und des Wissensstandes der Modellierenden. Dies mündet in der Annahme dieser Arbeit, daß die Strukturierung der Modelle und deren Inhalte nicht a priori bekannt sind, sondern sich entsprechend des Zwecks, der abzubildenden Datenbreite (Disziplin, Prozeß, Phase, ...) und eben auch entsprechend der Vorlieben und des Wissensstandes des Modellierenden unterscheiden. Daraus resultiert eine weitere Begründung des im folgenden eingehender diskutierten dynamischen interaktiven verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellansatzes, welcher speziell auf die Kohärenzabbildung zwischen a priori<sup>23</sup> nicht bekannten Partialmodellen abzielt. **Modellstruk-turen und -inhalte a priori nicht bekannt**

Aus der Unnormiertheit der Planungsprozesse und der Differenziertheit und Zustandsvarianz der Planungsgegenstände resultiert schlußfolgernd aus den oben aufgeführten Anforderungen die Notwendigkeit der Betrachtung der de facto vorliegenden Dynamik der erforderlichen Datengesamtheit [Gal95].

---

<sup>23</sup>Zeitpunkt der initialen Modellspezifikation

Dies muß sich entsprechend des Ansatzes der vorliegenden Arbeit in der Abbildung und Verwaltung dynamisch modifizierbarer Partialmodelle innerhalb eines dynamisch anpaßbaren Modellverbundes (Bauwerksmodell) und dem daraus resultierenden dynamisch veränderlichen Beziehungsgefüge zwischen den Partialmodellen widerspiegeln [WWPB00] (s. Abschnitt 4).

Diesbezüglich werden im folgenden die theoretischen Grundlagen einer derartigen dynamischen Bauwerksmodellierung erörtert und entsprechende Erläuterungen zum Ansatz innerhalb dieser Arbeit gegeben.

**Forderung:**  
ABBILDUNG  
DER DYNAMIK  
DES  
BAUWERKSLE-  
BENSZYKLUSSES

### 3.4 Dynamik von Bauwerksmodellen

Die Stagnation bei der Entwicklung lebenszyklusumfassender Bauwerksmodelle bzw. die Erkenntnis deren außerordentlicher Komplexität (auch im Rahmen der Standardisierungsbemühungen s. Abschnitt 3.1.4) führt unweigerlich zur Untersuchung und Diskussion dynamischer Aspekte bei der Spezifikation und Verwaltung von Bauwerksmodellen.

Eine dieser Überzeugung folgende Tendenz belegen diverse Publikationen [Hov93], [WK95], [HS95], wobei hier motivierend ein Zitat von Junge und Liebich [JL95] herangezogen wird:

*Almost all building product models are static constructions, they provide valid definitions of data for a given point in time. A building however goes through various valid stages from conceptual design, workshop design, construction, use, refurbishment, etc.. . . . There are requirements for dynamic change of definitions, extendibility of the model, unforeseen type changes, etc.. . . Current techniques does not seem to be able to cope with these demands.*

Auf Bauwerksmodell- bzw. Partialmodellebene besteht das Ziel eines dynamischen Bauwerksmodellansatzes in der Bereitstellung der prinzipiellen Möglichkeit, Modellstrukturen<sup>24</sup> während der Laufzeit<sup>25</sup>, also während der Verwendung eines Modells, zu modifizieren [HH00], [WH00].

Diese derartigen Modifikationen beziehen sich hierbei ausschließlich auf das Bauwerksmodell. Die Veränderlichkeit der Bauwerksmodelldaten (Erzeugen von Daten - Instanzen, Wertänderungen in Attributen, wechselnde Beziehungen zwischen Instanzen durch verschiedenartig ausgeprägte Relationen) sind elementarer Bestandteil des objektorientierten Paradigmas und demnach nicht spezifisch unter dem hier verwendeten Begriff der Dynamik subsumiert.

**Ziel:**  
MODELLMODI-  
FIKATION ZUR  
LAUFZEIT

<sup>24</sup>Unter dem Begriff MODELL ist im Kontext dieser Arbeit abkürzend immer das Bauwerksmodell und unter DATEN sind immer die Bauwerksmodelldaten zu verstehen.

<sup>25</sup>Im vorliegenden Ansatz umfaßt diese Laufzeit den Lebenszyklus des Bauwerkes.

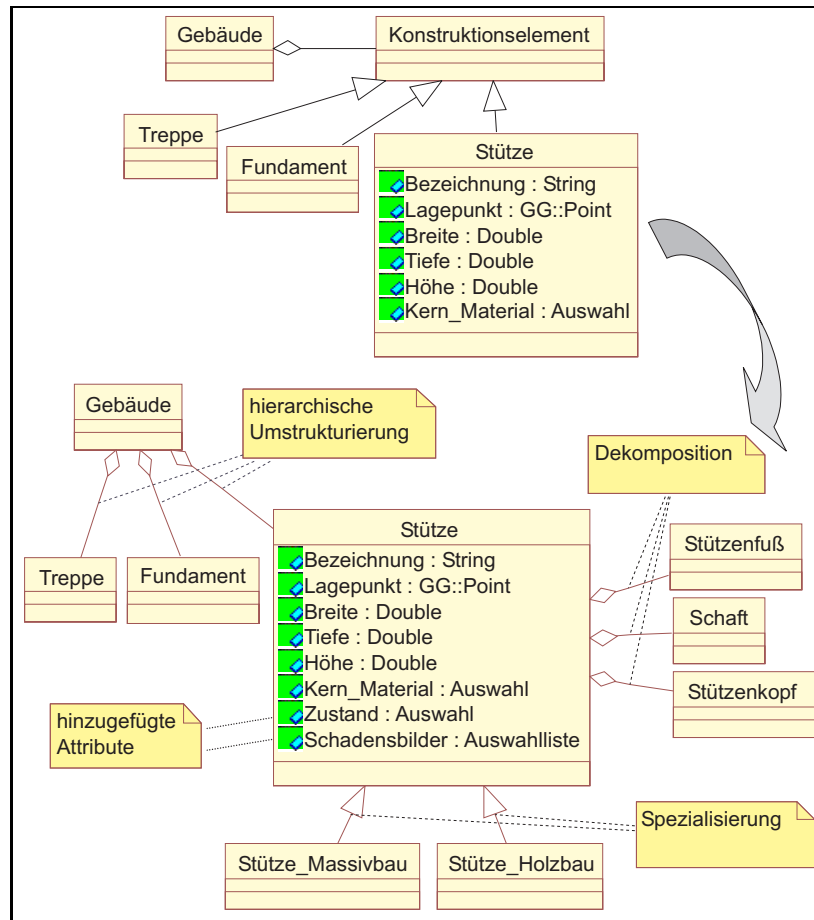


Abbildung 3.12: Beispiele dynamischer Modellmodifikationen

Unter den dynamischen Modelladaptionen bzw. -modifikationen (s. Abbildung 3.12) werden im wesentlichen folgende verstanden:

- Spezialisierungen und Dekompositionen von Klassen
- hierarchische Umstrukturierungen von Klassen im Partialmodell
- Umbenennungen von Klassen und Attributen
- Erzeugen und Löschen von Klassen bzw. Attributen.

Die Realisierung und Bereitstellung dieser laufzeitdynamischen Modellierungstechniken erfordern alternative Bauwerksmodellverwaltungsstrategien, welche detailliert in Abschnitt 3.4.1 dargestellt werden.

Um eine laufzeitdynamische Modifikation des Bauwerksmodells zu gewährleisten, muß die dem Bauwerksmodell übergeordnete Modellierungskonzeptebene einbezogen und verwaltet werden (s. Abbildung 3.13).

Das Modellierungskonzept beschreibt bzw. definiert das Format, die Struktur und

**Ansatz:**  
INTEGRATION  
DER MODELLIE-  
RUNGSKON-  
ZEPTEBENE



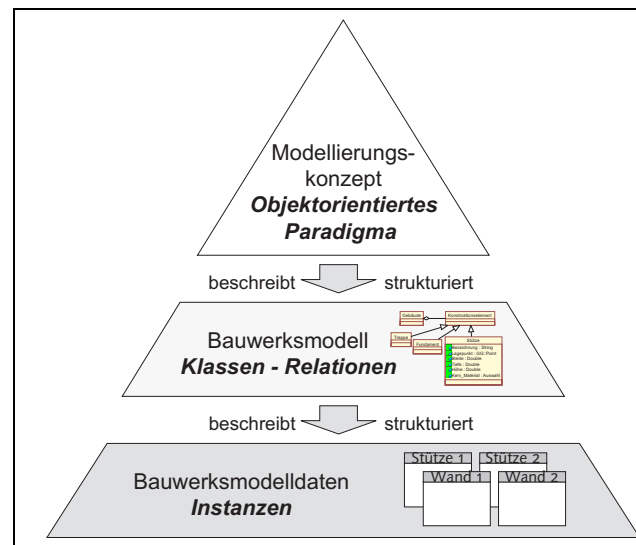


Abbildung 3.13: Ebenen eines Bauwerksmodells

die Semantik der auf Modellebene (Bauwerksmodellebene) verwendbaren Modellierungselemente.

Im Kontext dieser Arbeit bildet das objektorientierte Paradigma dieses Modellierungskonzept (s. Abschnitt 3.1.2) und beschreibt demnach Modellierungselemente wie: Klasse, Instanz, Generalisierung, Aggregation oder Assoziation.

Laufzeitdynamische Veränderungen auf Bauwerksmodellebene erfordern die Beschreibung von Funktionen und Methoden auf Modellierungskonzeptebene<sup>26</sup>, welche die Modellebene entsprechend den Anforderungen und Definitionen des Modellierungskonzeptes modifizieren. Beispielsweise werden additive Veränderungen auf Bauwerksmodellebene (z.B. Spezialisierung oder Dekomposition) durch das Hinzufügen von Ausprägungen (Instanzen) spezieller Elemente der Modellierungskonzeptebene zum Bauwerksmodell realisiert (s. Abbildung 3.14).

Die Integration der Modellierungskonzeptebene in die zu verwaltende Gesamtbauwerksmodellarchitektur zur Gewährleistung der dynamischen Modifikationen des Bauwerksmodells stellt gegenüber herkömmlichen Datenhaltungen grundlegend differenzierte Anforderungen an die Bauwerksmodellverwaltung. Die zu klärenden Probleme und die entsprechenden Lösungsansätze werden im folgenden Abschnitt 3.4.1 diskutiert.

Zunächst soll jedoch unter Einbeziehung der dargestellten Ergebnisse der Anforderungen an Bauwerksmodelle und speziell der daraus resultierenden Betrachtung der dynamischen Aspekte, die Bauwerksmodelldefinition für den Rahmen dieser Arbeit weiter angepaßt werden.

<sup>26</sup>Vielfach wird diese Ebene auch als Metaebene der Modellebene interpretiert [Ste97].

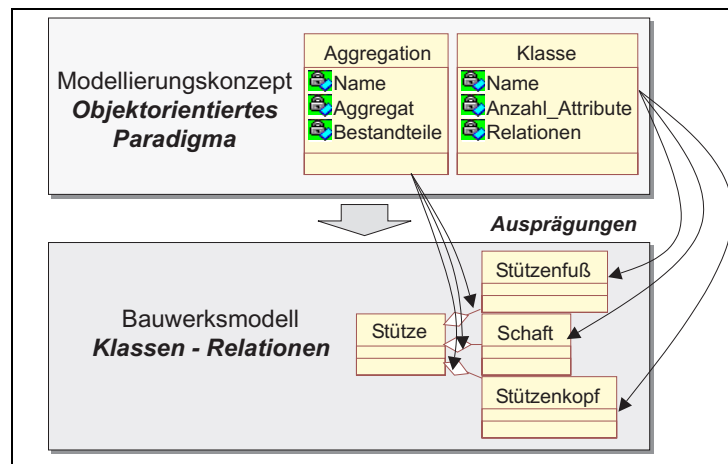


Abbildung 3.14: Ausprägungen von Modellierungskonzeptelementen

Resultierend ergibt sich als aktuelle Definition für das hier verwendete Bauwerksmodell:

**Bauwerksmodell** Das digitale Bauwerksmodell konstituiert sich dynamisch aus der Menge der aktuell involvierten, zur Laufzeit modifizierbaren Partialmodelle, inklusive des zwischen diesen existierenden expliziten, dynamisch anpaßbaren Beziehungsgefüges.

### 3.4.1 Verwaltung dynamischer Modelle

Die Verwendung von Bauwerks- bzw. Partialmodellen speziell im Rahmen integrierender Lebenszyklusbetrachtungen von Bauwerken wird besonders durch die prozeß- und phasenübergreifende strukturierte Beschreibung und Bereitstellung aller benötigten Daten und Informationen zur Entscheidungsunterstützung in den jeweiligen Prozessen motiviert.

Demzufolge besteht die Hauptaufgabe der Bauwerksmodellverwaltung in der Organisation, Speicherung und Bereitstellung der Modelldaten. Dieser Aspekt der Verwaltungs- und Austauschaufgabe eines Bauwerksmodells und mithin der Bauwerksmodellverwaltung wurde bereits ausführlich in Abschnitt 2.2 diskutiert.

Die diesbezügliche Verfügbarkeit eines Modells und die anschließende Instanziierung und Bearbeitung der Modelldaten setzen folgende im Vorfeld der Verwendung iterativ auszuführende Entwicklungssequenz voraus [Ste97]:

Modellentwicklung  $\Rightarrow$  Modellvergegenständlichung  $\Rightarrow$  Modellinstanziierung

Die Objektorientiertheit als Modellierungskonzept zugrundelegend, ergibt sich dieser Chronologie entsprechend:

oo-Analyse  $\Rightarrow$  oo-Softwaredesign  $\Rightarrow$  oo-Systemrealisierung (z.B. CAD)

Demnach werden die mit Hilfe der Mittel des Modellierungskonzeptes erstellten (beschriebenen) Modelle<sup>27</sup> (Bauwerksmodell bzw. Partialmodelle) anschließend im Rahmen der Implementierung in ein Programmsystem überführt. Während der Nutzungsphase (heute üblicher kompilierter Systeme) kann von den Klassen des Modells ausschließlich durch Instanziierung Gebrauch gemacht werden. Eine Veränderung des Modells (der Klassen und deren Beziehungen untereinander) ist auf diese Art und Weise nur durch einen vollständigen Neudurchlauf der oben dargestellten Entwicklungssequenz realisierbar. Diese zeit- und kostenintensive ineffiziente Vorgehensweise bringt überdies Migrationsprobleme hinsichtlich der dann auf Basis „älterer“ Modellversionen erzeugten Daten.

Ausgehend von der fundamentalen Annahme dieser Arbeit, Bauwerksmodelle seien aufgrund nicht vorhersagbarer Informationsanforderungen und der prinzipiellen Komplexität im Bauwerkslebenszyklus nicht allumfassend spezifizierbar, müssen die einleitend zu diesem Abschnitt beschriebenen Konzepte zur dynamischen Modellentwicklung und -adaption innerhalb der Bauwerksmodellverwaltung durch spezifische Modellverwaltungssysteme<sup>28</sup> umgesetzt werden. Der ebenfalls bereits diesbezüglich diskutierte Lösungsansatz der zusätzlichen Abbildung und Verwaltung der Modellierungskonzeptebene und dessen Konsequenzen sollen anschließend detaillierter untersucht werden.

Resultierend aus der Notwendigkeit dynamischer Modellmodifikationsmöglichkeiten speziell unter dem Aspekt der deskriptiven Modellierung, welche in Abschnitt 2.2 als grundlegender Modellierungsansatz und als Basis der Integration im Rahmen dieser Arbeit herausgestellt wurde, stellen insbesondere Funktionen zur Beschreibung, Generierung und Analyse des zu verwaltenden Bauwerksmodells den Hauptleistungsumfang der Modellverwaltung neben der vorausgesetzten Verwaltung der Modelldaten dar.

Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz der Integration der Modellierungskonzeptebene führt unter Beibehaltung des oo-Paradigmas zu einem objektorientierten, dynamikunterstützenden Modellverwaltungssystem (MVS).

Die höhere Qualität dieser Verwaltung gegenüber herkömmlichen Datenverwaltungssystemen wird bereits durch den verwendeten Begriff deutlich, dessen Intention auf die tatsächliche „Modell“-verwaltung im Sinne des Bauwerksmodells abzielt [WH99].

Dem oo-Paradigma zufolge wird die Modellierungskonzeptebene als strukturierte Menge von Klassen<sup>29</sup>, welche die Modellierungskonzeptelemente repräsentieren, konzipiert und im Rahmen des Modellverwaltungssystems realisiert.

**Hauptmerkmale  
dynamischer  
MVS:**  
BESCHREIBUNG,  
GENERIERUNG  
UND ANALYSE  
DES **Bau-  
werksmodells**  
UND DER  
**Bauwerksmo-  
delldaten**

<sup>27</sup> möglicherweise unter Verwendung eines CASE-Tools

<sup>28</sup> im folgenden als dynamische Modellverwaltungssysteme (MVS) bezeichnet

<sup>29</sup> nachfolgend als Metaklassen bezeichnet

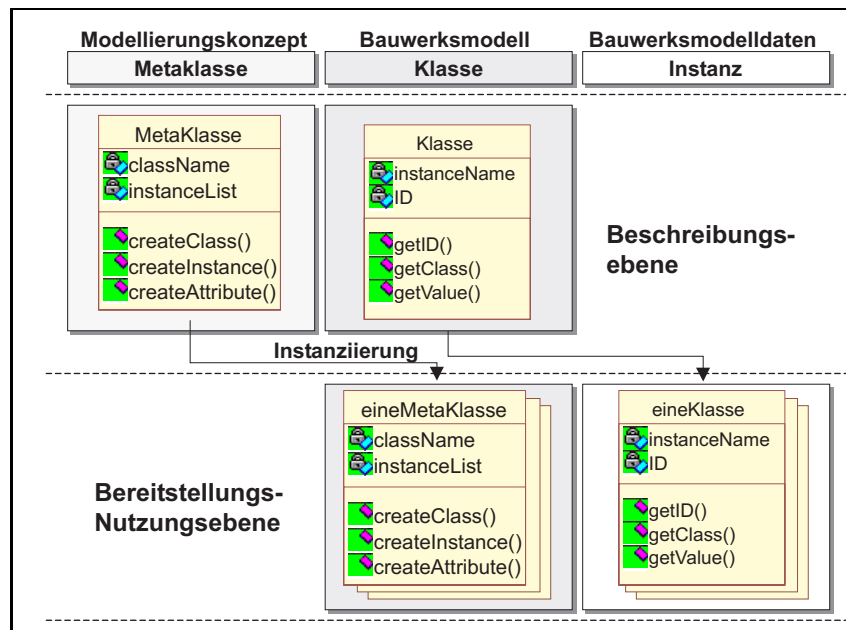


Abbildung 3.15: Funktionalitätsspezifikation und -bereitstellung

Die Unterscheidung zwischen den Klassen der Modellierungskonzeptebene (Metaklassen) und den Klassen auf Bauwerksmodellebene ist für das Verständnis prinzipiell und für die Zuordnung der spezifischen modifizierenden und analysierenden Funktionen essentiell.

Die Metaklassen beschreiben die geforderte Funktionalität<sup>30</sup> zur Adaption und Analyse von Bauwerksmodellelementen, welche sie den korrespondierenden Elementen des Bauwerksmodells durch den objektorientierten Instanziierungsmechanismus zur Verfügung stellen (s. Abbildung 3.15), d.h. eine Klasse auf Bauwerksmodellebene besitzt im Sinne ihrer Verwendung als KLASSE zur Laufzeit des Modells aufrufbare Methoden<sup>31</sup>, welche die Modifikation und Analyse des Bauwerksmodells respektive der entsprechenden Elemente realisieren.

Die Klassen auf Bauwerksmodellebene wiederum beschreiben die Funktionalität (diese besitzen sie nicht), die letztlich die ausgeprägten Instanzen zur Bearbeitung der Bauwerksmodelldaten aufweisen.

Eine detailliertere Unterteilung der Funktionalität nach ihrer deskriptiven Ebenenzugehörigkeit, speziell für das Modellierungselement KLASSE, wird in Tabelle 3.1<sup>32</sup> vorgenommen. Die in Tabelle 3.1 dargestellte Funktionalität ist Bestandteil der in dieser Arbeit zur prototypischen Realisierung der Modellverwaltungssysteme herangezogenen AKO-Schnittstelle [Kol98].

<sup>30</sup>beschreiben heißt: für die Instanzen spezifizierend - jedoch nicht selbst besitzend

<sup>31</sup>aus Implementierungssicht: statische Methoden bzw. class methods

<sup>32</sup>Der Pfeil im Tabellenkopf ist als Instanziierung zu interpretieren und verweist demnach auf das die Funktion aufrufbar vorhaltende Element.

Eine vollständige Auflistung aller Elemente und ihrer Funktionalität ist der Schnittstellenbeschreibung [Arb01] zu entnehmen.

	Modellierungsebene <b>Metaklasse <math>\Rightarrow</math> Klasse</b>	Modellebene <b>Klasse <math>\Rightarrow</math> Instanz</b>
modifizierende Funktionen	createClass deleteClass createInstance deleteInstance createAttribute deleteAttribute	
analysierende Funktionen	getName getSchema getClassCardinality getClasses getSuperClassCardinality getSuperClasses getSubClassCardinality getSubClasses getAttributeCardinality getAttributes getInstanceCardinality getInstance	getName getID getClass getAttribute getValue
manipulierende Funktionen	setClassname setSuperClass unsetSuperClass	setName setValue

Tabelle 3.1: Funktionalität der Modellverwaltung

Aus der Spezifik des Ansatzes der laufzeitdynamischen Generierung von Klassen und Attributen resultieren Konsequenzen bezüglich des Datenzugriffes.

Die herkömmliche Modellerstellung und -verwendung zeichnet sich, wie anfangs dieses Abschnittes dargelegt, durch eine initiale Bauwerksmodellierung aus, wobei die abzubildenden bzw. zu verwaltenden Entwurfsobjekte der Datengesamtheit in Klassen (Typen) strukturiert werden. Im Rahmen dieser Spezifikation werden die Klassen um Attribute, Relationen und Methoden angereichert und legen damit den eindeutigen Typ der später daraus erzeugten Instanzen fest.

Modellierungselement		Modellelement		Modelldatum
Typ		Instanz-Typ		Instanz
<b>Klasse</b>	$\Rightarrow$	WAND	$\Rightarrow$	EINEWAND

Auf diese Weise können durch Kenntnis der angelegten Attribute auch entsprechende attributspezifische Zugriffsmethoden definiert werden.

Der hier zu diskutierende Ansatz der dynamischen Bauwerksmodellverwaltung unterscheidet sich diesbezüglich durch die Tatsache, daß wie in Abbildung 3.15 dargestellt, die Elemente der Modellierungskonzeptebene zur Laufzeit des Modells (Programms) instanziiert werden, um entsprechende Elemente auf Modellebene zu erzeugen. Diese Bauwerksmodellelemente liegen als allgemeine generische Ausprägungen der Elemente des Modellierungskonzeptes vor und stellen somit keine speziellen Klassen oder Typen wie bei herkömmlicher Modellierung dar.

Modellierungselement		Modellelement		Modelldatum
Typ		Instanz-Typ		Instanz
<b>Metaklasse</b>	$\Rightarrow$	<b>Klasse</b>	$\Rightarrow$	<b>Instanz</b>
		className = ‚Wand‘		instName = ‚eineWand‘

Der **KLASSE** - als Instanz einer **METAKLASSE** - können zur Laufzeit beliebige Attribute und Relationen hinzugefügt werden, dennoch bleibt sie grundsätzlich eine **KLASSE**, welche sich nur über die gesetzte Namenseigenschaft (s. Abbildung 3.15 - Attribut *className* := ‚Wand‘) oder beispielsweise einen Attributvergleich als Repräsentant eines speziellen Typs identifizieren läßt.

Durch die Dynamik des MVS, insbesondere durch die gegebenen Möglichkeiten, zur Laufzeit Klassen und Attribute anzulegen oder umzubenennen, können prinzipiell<sup>33</sup> keine spezifischen Zugriffsmethoden generiert werden. Der Zugriff auf spezielle Klassen und Attribute (und deren Wertbelegungen) muß deshalb zunächst über analysierende Funktionen wie *getClass* und die weiteren (selektierenden) Aufrufe an der identifizierten Klasse *getAttributes* oder *getAttribute* erfolgen, bevor eine tatsächliche Wertmanipulation bzw. Wertermittlung eines speziellen Attributes durch eine entsprechende Methode *setValue* bzw. *getValue* realisiert werden kann (s. Tabelle 3.1).

### 3.4.2 Modellverwaltungssysteme

Die zu Beginn des Abschnittes 3.4 und in Abschnitt 3.4.1 dargelegten Anforderungen und die daraus resultierenden Konzepte zur Verwaltung dynamisch modifizierbarer Bauwerksmodelle führen zur Schaffung spezieller Modellverwaltungssysteme. Unter Verwendung des oo-Paradigmas als konzeptuelle Grundlage der Modellierung und als Implementierungsbasis gilt im Rahmen dieser Arbeit folgende Definition für objektorientierte Modellverwaltungssysteme.

**oo-Modellverwaltungssystem** Ein objektorientiertes Modellverwaltungssystem stellt ein implementiertes Werkzeug zur interaktiven dynamischen Modellentwicklung und -verwaltung dar. Es erlaubt die vorrangig deskriptiv orientierte Verwaltung und Benutzung, der vom Anwender zur Laufzeit

<sup>33</sup>kompilierende Implementationen vorausgesetzt

erstellten und auf den Konstrukten des Modellierungsparadigmas - Objektorientiertheit - basierenden Elementen, sowohl auf Modell- als auch auf Datenebene.

Objektorientierte MVS können je nach verfolgter Intention in ihrer Konzeption und Realisierung ganz unterschiedlich ausgeprägt sein. Die Kategorie der oo-MVS umfaßt zunächst allgemeine generische Systeme wie: oo-Datenbanken (ONTOS, ObjectStore, GemStone, ...), oo-Programmiersprachen (C++, Smalltalk, JAVA, ...), Objektmodellarchitekturen (z.B. OMG-OMA<sup>34</sup>) und Objektmodellaustauschformate (STEP) bzw. -schnittstellen (z.B. AKO s. Abschnitt 6.2.1). Detaillierte vergleichende Aussagen hinsichtlich deren Eignung im vorliegenden Kontext können [Bac96] und [TT99] entnommen werden. Prinzipiell offenbaren diese Systeme Schwächen und Nachteile bei der laufzeitdynamischen Modelladaption, welche entweder nur bedingt oder gar nicht ausgeprägt ist oder woraus im Falle des Vorhandenseins erhebliche Verluste der Laufzeiteffizienz resultieren. Zudem muß bei den meisten Systemen eine mangelnde Funktionalität hinsichtlich spezifischer Anforderungen bei der Modellanalyse und -erweiterung konstatiert werden.

Auf Grund der Unzulänglichkeiten der genannten generischen MVS wurden in verschiedenen Forschungsprojekten alternative Modellverwaltungssysteme entwickelt.

Das System PREPLAN wurde speziell für die Unterstützung früher Entwurfsphasen und zur Abbildung fachspezifischen formalen und informal Entwurfswissens konzipiert und realisiert [HKS94], [Ste94], [Ste97]. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die top-down orientierte Erweiterung vorgegebener Basistaxonomien um die entsprechenden im Entwurfsprozeß auftretenden Detaillierungen im Sinne von Dekompositionen und Spezialisierungen auf der Basis erweiterter Attribut- und Relationenkonzepte gerichtet. Dieses System inklusive konzeptioneller Details und verschiedener Realisierungsansätze ist ausführlich in [Ste97] dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der softwaretechnischen Realisierung des dem System PREPLAN zugrundeliegenden MVS-Prototypen FLEXOB<sup>35</sup> wird in [Weh95] und [WSH97] gegeben.

Ein in der Zielstellung ähnlicher Ansatz für den Bereich der Bauaufnahme bzw. des Bauaufmasses wurde mit der Entwicklung des DMMS<sup>36</sup> verfolgt. Hauptaufgabe dieses MVS ist es, dem Aufnehmenden während seiner Tätigkeit die Möglichkeit zu geben, eine dem real existierenden Gebäude entsprechende dynamisch anpaßbare Gebäudebeschreibung und -strukturierung zu erstellen, um die aufgemessenen und beobachteten Daten adäquat ablegen zu können. Allgemeine

---

<sup>34</sup>Object Management Group - Object Management Architecture

<sup>35</sup>Flexibles Objektsystem

<sup>36</sup>Dynamic Model Management System

Informationen hierzu können [DP97] [Pet00] und hinsichtlich spezieller Realisierungsdetails [TT99] entnommen werden.

Neben diesen eher für spezielle Teilaspekte im Bauwerkslebenszyklus konzipierten MVS, wurden auch integrativ orientierte Modellverwaltungssysteme entwickelt. Das System CADOOM<sup>37</sup> stellt den Versuch der Realisierung eines zentralen Produktmodellierers dar, welcher sowohl die Produktmodelldaten als auch das Produktmodell interaktiv modifizierbar verwaltet und graphisch visualisiert [Kow97]. Trotz der ursprünglich integrierenden Intention ist dieser Ansatz für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes unzureichend, da die Spezifikation eines zentralen allumfassenden Bauwerksmodells (wie es dieses System erfordert) aus den bereits mehrfach dargelegten Gründen der Komplexität unmöglich ist.

Als Bestandteil bzw. als „industrielle Implementation“ der Ergebnisse des ESPRIT - Projektes VEGA wurde die O.P.E.N.<sup>38</sup>-Plattform realisiert [BJS98]. Die O.P.E.N. - Plattform wurde als branchenunabhängige offene IT-Umgebung für die integrative Unterstützung komplexer Produktmodelle und Prozesse entwickelt. Auf der Basis ihres Hauptbestandteils dem DPM<sup>39</sup>-Kernel [Bee97], ist sie in der Lage, in EXPRESS formulierte, aufeinander abgestimmte (in der Regel auf STEP oder den IFC basierende) Modelle zur Laufzeit einzubinden und zu modifizieren.

Ebenfalls in diese Kategorie der MVS ist der im MIKO-Projekt gewählte Ansatz einzuordnen [GKP<sup>+</sup>97]. Die vordringliche Aufgabe bestand hierbei in der dynamischen Verwaltung und Integration STEP-basierter Partialmodelle mit dem Ziel, der Realisierung eines transparenten Datenaustausches bzw. -zugriffes und eines effizienten Änderungsmanagements [TGW97].

Das System GROUPPLAN, als Weiterentwicklung des oben genannten PREPLAN-Projektes, wurde hauptsächlich zur Integration der kooperativen Aspekte im Bauwerksentwurf konzipiert [HH97]. Dabei stehen insbesondere die Unterstützung der Teamarbeit der beteiligten Fachplaner durch die Bereitstellung asynchroner und synchroner Kooperationsmechanismen sowie weiterer CSCW-Aspekte wie beispielsweise tele-presence Techniken im Vordergrund [HH00].

### 3.5 Zusammenfassung

Die Entwicklungsstadien und die Ergebnisse zahlreicher Forschungsprojekte und Standardisierungsbemühungen der letzten Jahre (s. Abschnitt 3.1.3 und 3.1.4) belegen die Notwendigkeit der deskriptiven Bauwerksmodellierung zur Unterstützung integrativer Lebenszyklusbetrachtungen im Bauwesen.

Der enormen Komplexität und Vielfalt des Datenbestandes und dessen verschie-

---

<sup>37</sup>Computer Aided Dynamic Object Oriented Modeler

<sup>38</sup>Objectoriented Product model Engineering Network

<sup>39</sup>Dynamic Product Model



denartigen Interpretationen in lebenszyklusweiten Modellansätzen (s. Abschnitt 3.1.2) muß mit entsprechenden komplexitätsreduzierenden Maßnahmen begegnet werden. Hierzu zählt einerseits die Modellzerlegung in Partialmodelle (Abschnitt 3.2.1), die vorteilhafterweise in einer hybriden Modellarchitektur (s. Abschnitt 3.2.2) konzipiert und verwaltet werden. Andererseits betrifft dies die Anwendung des objektorientierten Modellierungsparadigmas (Abschnitt 3.1.2), welches zunächst die objektorientierte Modellierung im Gegensatz zur zeichnungsorientierten Modellierung unterstützt und überdies verschiedene notwendige Abstraktionsmechanismen (Abschnitt 3.1.2) direkt bereitstellt.

Trotzdem kann nicht von einer allumfassenden für den gesamten Lebenszyklus gültigen Spezifikation von Bauwerks- oder Partialmodellen ausgegangen werden (Abschnitt 3.4), was die laufzeitdynamische Anpassung und Verwaltung der Modelle und resultierend auch der Daten erfordert. Diese Annahme stellt auch die Anwendbarkeit der Standardisierungsbemühungen für den gesamten Lebenszyklus in Frage.

Die dynamische Modellverwaltung kann unter Einbeziehung der Modellierungskonzeptebene realisiert werden (s. Abschnitt 3.4.1), was spezielle Modellverwaltungssysteme (Abschnitt 3.4.2) notwendig macht.

Die Analyse verschiedener Modellverwaltungssysteme zeigt, daß die deskriptive bauwerkslebenszyklusumfassende Modellierung im Sinne eines VIRTUELLEN BAUWERKS entweder nicht im Fokus der Anstrengungen innerhalb der Projekte liegt oder daß dieses Abbild der Realität über die Einbeziehung spezifizierter (standardisierter) Partialmodelle realisiert werden soll.

Bezüglich der in diesem Kapitel dargelegten Auffassungen zur (dynamischen) Spezifikation und Verwaltung digitaler Bauwerksmodelle dient das nächste Kapitel der ausführlichen Darstellung und Diskussion des im Kontext dieser Arbeit gewählten verknüpfungsbasierten dynamischen Bauwerksmodellansatzes. Der spezielle Fokus liegt dabei, wie bereits mehrfach angekündigt, auf der Abbildung der Kohärenz der Partialmodelle innerhalb des dynamisch anpaßbaren Bauwerksmodellverbundes.

# Kapitel 4

## Verknüpfungsbasierter Ansatz

*... Currently, the discussion focusses on the question,  
how to interconnect these partial models?*  
Junge und Liebich [JL97]

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Zweckmäßigkeit der Realisierung einer bauwerkslebenszyklusweiten Integration aller beteiligten Akteure und Applikationen auf Basis eines digitalen Bauwerksmodells im Sinne eines Virtuellen Bauwerkes konstatiert und belegt.

Speziell in den Abschnitten 3.2.1 und 3.4 wurde dargelegt, daß nur ein dynamisch modifizierbarer Bauwerksmodellverbund bestehend aus laufzeitdynamisch adaptierbaren Partialmodellen einen geeigneten, hinreichend flexiblen und den spezifischen Rahmenbedingungen und Anforderungen im Bauwesen genügenden Lebenszyklusmodellansatz darstellt.

**Virtuelles  
Bauwerk**  
EINHEIT AUS  
PARTIALMO-  
DELLEN UND  
BEZIEHUNGS-  
GEFÜGE

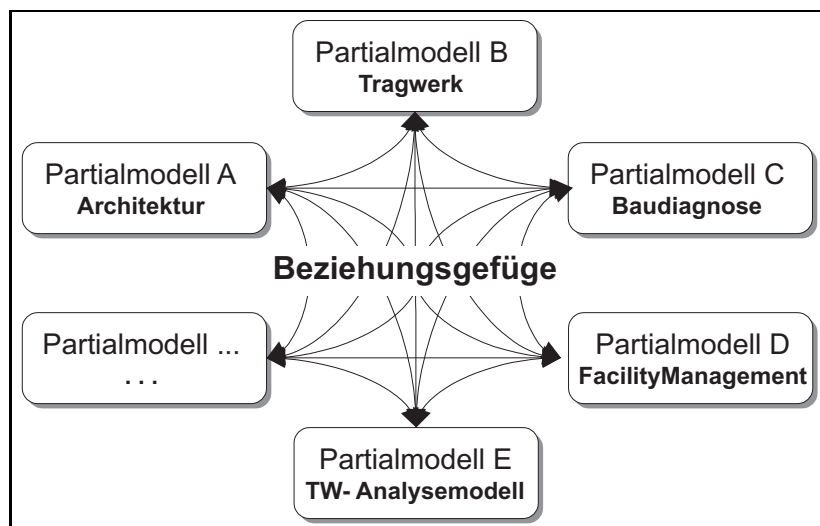


Abbildung 4.1: Logisches Bauwerksmodell

Die Repräsentation des Gesamtdatenbestandes durch kohärente Partialmodelle und die vorhandene Modell- und Prozeßdynamik bedingen spezielle koordinierende Mechanismen zur Abbildung und Verwaltung der zwischen den einzelnen Partialmodellen existierenden Abhängigkeiten und Zusammenhänge.

Die explizite Beschreibung und Verwaltung dieses Beziehungsgefüges, welches in Verbindung mit dem Partialmodellverbund das logische Gesamtbauwerksmodell repräsentiert (s. Abbildung 4.1), bildet den speziellen Fokus des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten und hier vorzustellenden verknüpfungsbasierten Modellierungsansatzes.

In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels wird zunächst die Etablierung eines verknüpfungsbasierten Ansatzes unter den gegebenen Bauwerksmodellvoraussetzungen motiviert. Anschließend werden grundlegende Aspekte der Abbildung der Partialmodellkohärenz dargestellt und diskutiert, ehe darauffolgend der verknüpfungsbasierte Ansatz hinsichtlich seiner Architektur, Funktion und der Spezifik der Verknüpfungen detailliert wird.

**Gegenstand  
des Kapitels**  
ABBILDUNG  
UND  
VERWENDUNG  
EINES  
EXPLIZITEN  
BEZIEHUNGS-  
GEFÜGES

## 4.1 Motivation

In den vorangegangenen Kapiteln wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten verdeutlicht, daß (vor allem die planerisch orientierten) Prozesse im Bauwerkslebenszyklus (und darin involvierte Fachplaner) eine ganzheitlich integrierende und kooperative Sicht auf die Datengesamtheit und somit einen allumfassenden Informationsaustausch bzw. -zugriff benötigen.

Diese Notwendigkeit wird durch nachfolgend aufgeführte Zielstellungen<sup>1</sup> hinsichtlich der Unterstützung der Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus unterstrichen [Amo97]:

1. Zugriff auf alle notwendigen Informationen zur Erledigung der entsprechenden prozeß- und projektspezifischen Aufgaben
2. Verwendung verschiedener adäquater Tools und Applikationen (hard- und softwareunabhängig)
3. Experimentieren von Problemlösungen unabhängig vom Gesamtdatenbestand (temporäre Inkonsistenzen)
4. Erhaltung der prozeß- und domänenübergreifenden Datenkonsistenz
5. Möglichkeiten der Propagation von Datenänderungen mit Auswirkungen auf Daten und Entscheidungen anderer Beteiligter

INTEGRATIONS-  
UND  
KOOPERATIONS-  
BEZOGENE  
ZIELSTELLUN-  
GEN

---

<sup>1</sup>Die Notwendigkeit der Erreichung globaler Qualitätssteigerungen bei gleichzeitigen Kostensenkungen in Bauprojekten wurde ausführlich in den Abschnitten 1.2 und 2.1 dargelegt.

6. Erkennen und Lösen von Konflikten zwischen kooperierenden (konkurrierenden) Entscheidungen verschiedener Beteiligter
7. Möglichkeiten zur Projektsteuerung

Besonders die genannten kooperations- und kommunikationsbezogenen Zielstellungen (1, 4, 5 und 6) bedingen eine integrierende deklarative Ordnungs- und Navigationsstruktur für die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Daten.

Bezüglich der Modell- und Datenintegration wird hierbei eine Verständigungsebene benötigt, die folgende Problemstellungen fokussiert:

- Überführungen zwischen Modellen<sup>2</sup>
- Generierung neuer Modelle aus gegebenen Modellen
- Sicherstellung der Konsistenz zwischen Modellen
- Propagation von Änderungen zwischen verknüpften Modellen.

## 4.2 Anforderungen

Innerhalb eines Partialmodellverbundes entsteht die Notwendigkeit der expliziten Verständigungsrealisierung durch die existierende Kohärenz der Partialmodelle.

Auf Grund ihrer domänen- bzw. prozeßspezifischen Intention im Bezug auf die Datengesamtheit unterscheiden sich die verschiedenen Partialmodelle sehr stark hinsichtlich des modellierten Datenumfangs und des Abstraktionsgrades (s. Abschnitt 3.3).

Daraus resultieren erhebliche Differenzen in den Modellstrukturen und der implizierten Semantik der verwendeten Modellelemente<sup>3</sup> (s. Abbildung 4.2).

Die existierenden Abhängigkeiten zwischen den Partialmodellen können daher in der Regel nicht durch die 1:1 Übernahme bzw. Abbildung identischer Modellelemente realisiert werden.

Zur Bereitstellung eines modellübergreifenden Informationsaustausches müssen Verständigungsmechanismen zur Überwindung der Unterschiede zwischen den Modellen geschaffen werden, deren Hauptziel demnach in der semantischen und strukturellen Harmonisierung der involvierten Partialmodelle besteht.

**Situation:**  
HETEROGENE,  
KOHÄRENTE  
PARTIALMO-  
DELLE

**Problem:**  
STRUKTURELLE  
UND  
SEMANTISCHE  
DIFFERENZEN  
ZWISCHEN PAR-  
TIALMODELLEN

---

<sup>2</sup>An dieser Stelle subsummiert der Begriff Modell sowohl die Elemente auf Modell- als auch auf Datenebene (Klassen und Instanzen).

<sup>3</sup>Unter Modellelementen werden in diesem Zusammenhang die vom Modellierungskonzept bereitgestellten Modellbeschreibungselemente verstanden (s. Abschnitt 3.1.2).

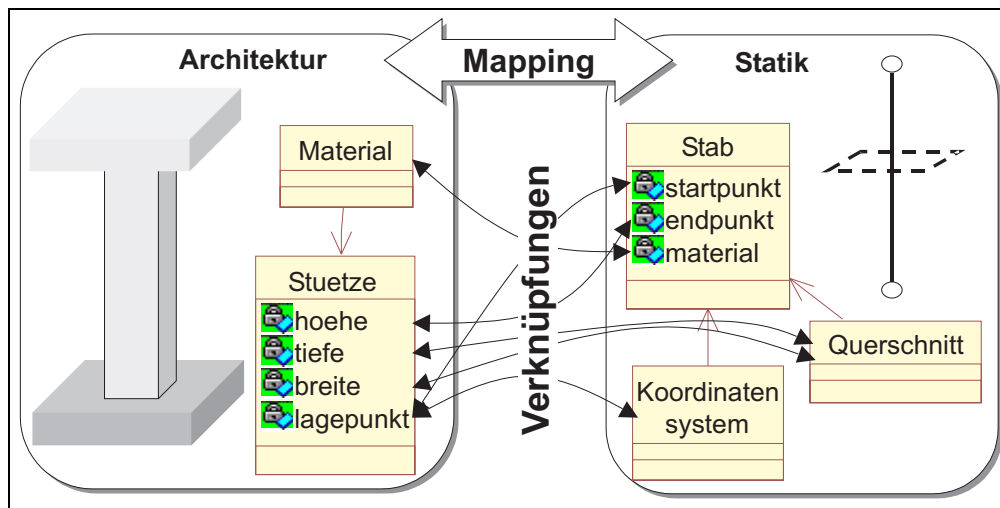


Abbildung 4.2: Differenzierte Modelle physisch identischer Entwurfsobjekte

Diese auch als Mapping bezeichnete Harmonisierung der Modelle läßt sich auf unterschiedliche Art und Weise realisieren (s. Abschnitt 4.3). Die verschiedenen Möglichkeiten der Etablierung einer derartigen Verständigungsbasis diskutierend, benennen Eastman et al. [EJCJ97] grundsätzliche Anforderungen an eine Mapping-Architektur:

**Sichtbarkeit der Konvertierlogik** Mit dieser Forderung wird die Notwendigkeit unterstrichen, den Mapping- bzw. Überführungsprozeß zwischen den Modellen für den Nutzer transparent zu gestalten. Es muß prinzipiell die Möglichkeit bestehen, sich sowohl über die Eingangs- und Ausgangsdaten als auch über die Überführungslogik zu informieren und die Mappingprozesse zu kontrollieren.

**Updates aus mehreren Quellen** Im Gegensatz zum herkömmlichen Datei-zu-Datei Datenaustausch muß eine adäquate Mappingarchitektur den Abgleich zwischen Daten mehrerer Quellmodelle und einem oder mehrerer Zielmodelle unterstützen.

**Möglichkeit inkrementeller Updates** Eine weitere wesentliche Anforderung stellt die Möglichkeit sukzessiver Teilmodellüberführungen dar. Durch die reduzierte Menge zu überführender Daten können zum einen Zeitersparnisse erreicht werden und zum anderen läßt sich ein spezieller Ausschnitt der Datengesamtheit fokussieren, um eventuelle Probleme oder Konflikte besser erkennen und lösen zu können.

**Erweiterbarkeit des Modells** Die Partialmodelle im einzelnen und mithin das Gesamtbauwerksmodell müssen erweiterbar sein (s. Abschnitte 3.3 und 3.4), um den aktuellen Anforderung an die Datengesamtheit, welche sich etwa

durch die Einbeziehung neuer Technologien, Aktivitäten und Prozesse ergeben, gerecht zu werden. Die zugrundeliegende Mappingarchitektur und die eingesetzten Verständigungsmechanismen (Überführungen) müssen diese Erweiterbarkeit der Modelle unterstützen bzw. handhaben können.

**Kooperationsunterstützung** Mit dieser Forderung werden hauptsächlich Aspekte der Kooperation und Kommunikation zwischen den beteiligten Akteuren und Applikationen adressiert. Hierzu zählen speziell Methoden zum Erkennen und Propagieren von Modell- und Datenänderungen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst Integrationsansätze bzw. Mappingarchitekturen verschiedener Forschungsvorhaben vorgestellt und an den oben aufgeführten Anforderungen gemessen.

Resultierend wird anschließend die dem Mapping zugrundeliegende Bauwerksmodellarchitektur des im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen verknüpfungsbasierten Ansatzes diskutiert und bewertet.

## 4.3 Stand der Forschung

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden und werden erhebliche Anstrengungen hinsichtlich integrativer und kooperativer Arbeitsumgebungen unternommen. Dabei stellt die Verbesserung der rechnergestützten Kooperation und Kommunikation der verschiedenen Fachplaner und deren Fachapplikationen und demnach auch die Etablierung effizienter Verständigungsformen die allen hier betrachteten Bemühungen zugrundeliegende Zielstellung dar.

Je nach Art der zu integrierenden Modelle im Sinne herstellerabhängig (proprietäre Applikationsmodelle) bzw. herstellerneutral lassen sich die Forschungsbemühungen in die zwei nachfolgend beschriebenen Kategorien unterteilen.

### 4.3.1 Integration herstellerspezifischer Modelle

Auf Grund der allgemeinen Tendenz (besonders bei Bauwerkslebenszyklusbetrachtungen) hin zu objektorientierten Bauwerks- und Partialmodellen (s. Abschnitt 3.1.3) fokussieren nur wenige Ansätze auf die Integration bzw. Kooperation herstellerspezifischer Fachapplikationsmodelle.

Vorhaben in dieser Kategorie realisieren die Kooperation und die notwendige Verständigung auf Basis eines Mappings bzw. Abgleichs entweder zwischen den von den Herstellern angebotenen Dateiaustauschformaten (Konverter) oder zwischen den herstellerspezifischen Datenmodellen mit Hilfe applikationsspezifisch bereitgestellter Programmierschnittstellen (API s. Abbildung 4.3).

Vielfach werden dabei zusätzlich Interoperabilitätskonzepte (z.B. COM/DCOM, CORBA) zur Unterstützung der zunehmend verteilt organisierten Arbeit eingesetzt.

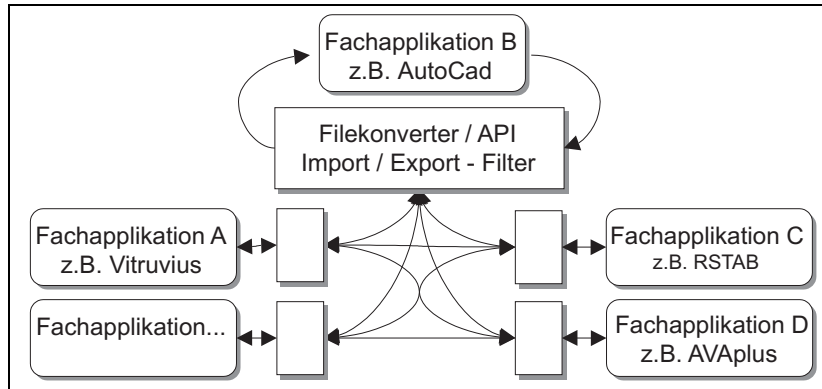


Abbildung 4.3: Herstellerspezifische Fachapplikationsintegration

Stellvertretend soll an dieser Stelle der Integrationsansatz von Schneider [Sch00] Erwähnung finden, da dieser Intentionen bezüglich der Nutzerimplikation bei der Schaffung bzw. Etablierung der Verständigungsbasis verfolgt, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit postuliert werden (s. Abschnitt 4.5.2).

Einen weiteren, dieser Kategorie zuzuordnenden Ansatz zur Unterstützung der kooperativen Arbeit im Bauplanungsprozeß stellt die Arbeit von Firmenich [Fir01] dar. Mit dem Ziel der Sicherstellung konsistenten Planungsmaterials werden hierbei CAD-Objektversionen in Beziehung gesetzt und mit Grundoperationen der Mengenalgebra verwaltet.

Die Nachteile dieser applikationsspezifischen Integration ergeben sich vor allem aus der großen Anzahl verfügbarer Fachapplikationen für unterschiedlichste Aufgaben, welche, speziell unter Beachtung der Vielzahl der daraus resultierenden erforderlichen Konvertierungen, unmöglich alle auf diese Art und Weise integriert werden können. Zudem sind die Möglichkeiten, auftretenden Änderungen im Projekt oder in den Datenanforderungen flexibel und mit geringem Zeit- und Kostenaufwand begegnen zu können, als äußerst begrenzt einzuschätzen. Ferner kann die in Abschnitt 4.2 aufgeführte Forderung nach Erweiterbarkeit der Modelle, auf Grund der in der Regel proprietären Modell- und Datenstrukturen herstellerepezifischer Fachmodelle, nicht realisiert werden.

Im Falle dateiaustausch-basierter Integrationsumgebungen stehen überdies kaum Möglichkeiten zur inkrementellen Datenüberführung zur Verfügung, noch bieten sie hinreichende Kooperationsunterstützung.

**Fazit (1):**  
 INTEGRATION  
 PROPRIETÄRER  
 FACHAPPLIKA-  
 TIONSMODELLE  
 INADÄQUAT

### 4.3.2 Integration mittels herstellerunabhängiger Modelle

Ein wesentlich höheres Potential zur Lösung der in Abschnitt 4.1 aufgeführten Zielstellungen bei gleichzeitiger Beachtung der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Forderungen bieten die in den meisten Projekten alternativ verfolgten Ansätze der Integration der Fachapplikationen mittels herstellerunabhängiger Bauwerks- bzw. domänenspezifischer Partialmodelle.

Vornehmliches Ziel dieser Kategorie angehörender Ansätze ist die Verringerung der zwischen den zu integrierenden Fachapplikationen zu konzipierenden und zu implementierenden Mappings (Schnittstellen).

Dabei wurden entsprechend der in Kapitel 3 Abschnitte 3.1.3 und 3.2.2 erläuterten Entwicklung der Bauwerksmodellarchitekturen korrespondierende integrationsunterstützende Methoden und Verfahren konzipiert und realisiert.

**Neutrales (zentrales) Bauwerksmodell** Ein derartiger Integrationsansatz etabliert ein globales Bauwerksmodell (s. Abbildung 4.4) als Basis für die Kommunikation und Kooperation der involvierten Fachapplikationen. Das hier vorzufindende direkte Mapping zwischen Applikationsmodellen und einer neutralen Datenrepräsentation entspricht dem grundlegenden Integrationsansatz der STEP Standardisierungsbemühungen (s. Abschnitt 3.1.4). Ein typischer Vertreter dieses

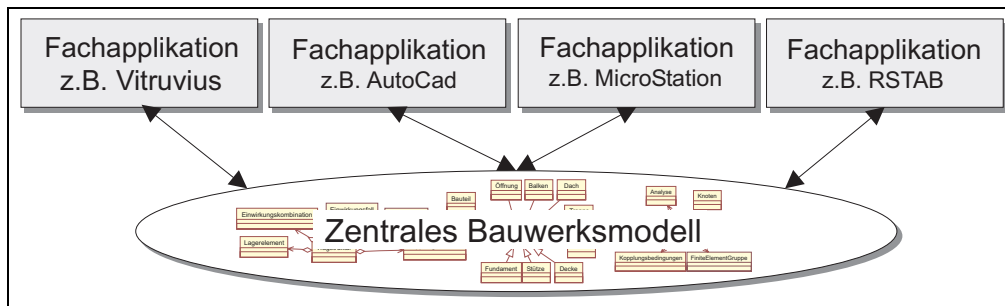


Abbildung 4.4: Zentrales herstellerneutrales Bauwerksmodell

Ansatzes ist das EU-Projekt COMBINE. Die Integration verschiedener Fachapplikationen basiert in diesem Projekt auf dem neutralen Bauwerksmodell IDM (*Integrated Data Model*). Das notwendige Mapping und damit auch der Datenaustausch zwischen den spezifischen Modellen der Fachapplikationen und dem IDM wird mit Hilfe von STEP Prä- und Postprozessoren (SDAI C++ Bindung) realisiert [Aug95].

Ein weiteres Projekt dieser Kategorie stellt das eher auf die Kooperationsunterstützung (s. Abschnitt 4.2) abzielende MIKO-Projekt dar [GKP<sup>+</sup>97]. Hierbei verwaltet eine objektorientierte Datenbank als Integrationsebene ein Konglomerat sämtlicher im Planungsprozeß auftretender Daten.



Obwohl die Anzahl der benötigten Mappings zwischen den Applikationsmodellen und dem neutralen Modell bereits deutlich geringer ist als beim reinen Mapping zwischen herstellerapezifischen Applikationsmodellen und trotz verbesserter Möglichkeiten zur Kooperationsunterstützung, stellt sich diese Kategorie der Integrationsansätze für eine große Menge von zu integrierenden Fachapplikationen ebenfalls als inadäquat heraus. Zum einen ist die prinzipiell resultierende Komplexität des neutralen Bauwerksmodells kaum zu handhaben (es muß jede involvierte Fachapplikation berücksichtigen) und zum anderen ist eine Modifikation des neutralen Modells praktisch nicht zu verwirklichen, da möglicherweise alle Mappings zu den Fachapplikationen davon betroffen wären und ebenfalls modifiziert werden müßten [EJCJ97].

**Fazit (2):**  
INTEGRATION  
DURCH  
NEUTRALES  
KERNMODELL  
AUF GRUND ZU  
HOHER  
KOMPLEXITÄT  
EBENFALLS  
INADÄQUAT

Einen weiteren alternativen Ansatz stellt das Projekt-FATIMA (Verteiltes Facility Management in Telekommunikationsnetzen) dar [KPP97b]. Ziel dieses Projektes ist die Realisierung einer Integrationsumgebung für das Facility Management. Hierzu wird ein Ansatz vorgeschlagen, welcher dezentrale Applikationsmodelle in einem zentralen Modellverbund zusammengeführt. Ein wesentliches Kriterium des Modellverbundes bildet dessen Konstitution aus generischen Modellelementen auf AKO-Basis [KRS97]. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Modellverbund während der Bearbeitung durch generische Applikationen zu variieren.

**Neutrales Bauwerksmodell + domänenspezifische Partialmodelle** Dieser Art der Integration abstrahiert domänenspezifische Partialmodelle (Sichten) von den vielen verschiedenen Modellen herstellerspezifischer Fachapplikationen (s. Abbildung 4.5).

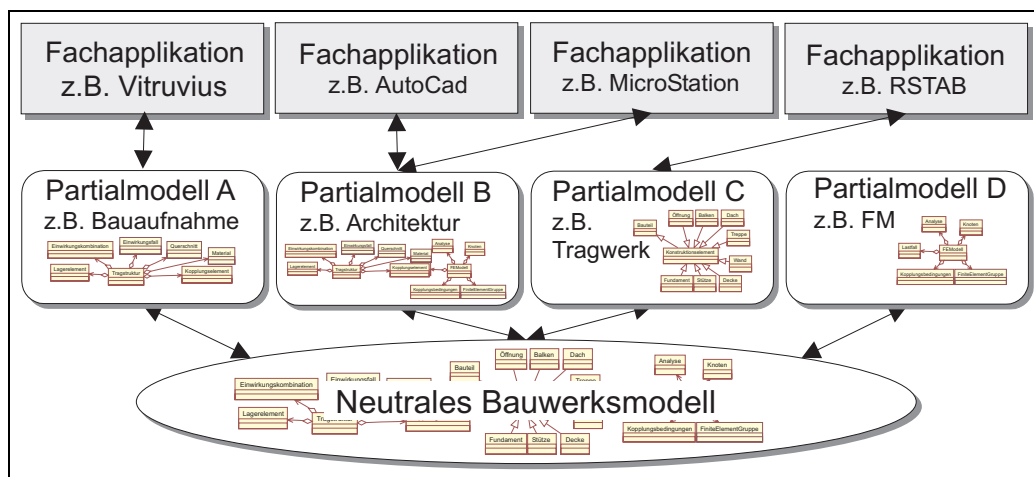


Abbildung 4.5: Integration herstellerunabhängiger Modelle

Auf diese Weise wird die Komplexität des neutralen Bauwerksmodells gesenkt, da nicht jede spezielle Datenanforderung jeder Fachapplikation berücksichtigt wer-

den muß. Die Mappings zwischen den Fachapplikationen und den Partialmodellen sind ebenfalls weniger komplex, da nur ein gemeinsamer domänenspezifischer Ausschnitt aus der Datengesamtheit betrachtet werden muß.

Als maßgebliche Vertreter dieser Integrationsvariante sind vor allem die Esprit-Projekte ATLAS, COMBI, VEGA und TOCEE zu nennen.

Bei all diesen Projekten bilden domänenspezifische Modelle die Schnittstelle zu den Fachapplikationen. Diese in den einzelnen Projekten unterschiedlich benannten domänenspezifischen Partialmodelle werden dann in einer übergeordneten neutralen Schicht zusammengeführt (s. Tabelle 4.1).

Projekt	Partialmodell	Neutrales Modell
ATLAS	View type Model	Object Management System
COMBI	Partial Model	Neutral Model
VEGA	Domain Model	Common Concepts + Minimal Kernel
TOCEE	Aspect Model	Neutral Product Model + Kernel

Tabelle 4.1: Bezeichnungen domänenspezifischer und neutraler Modelle

Die neutralen Schichten der einzelnen Projekte konstituieren sich je nach Einbeziehung verschiedener Aspekte der Prozeß-, Dokumenten- oder Verteilungsorganisation aus diversen weiteren domänenunabhängigen Schichten und stellen außerdem allgemeine Ressourcen wie Geometrieprimitive, Modellierungsparadigmen, Wertebereichsvorgaben u.ä. zur Verfügung.

Insgesamt orientieren sich sowohl die domänenspezifischen als auch die neutralen Modelle an den Vorgaben der Standardisierungsbemühungen IFC und STEP. Da die Modelle überwiegend in EXPRESS definiert sind, wird auch beim Datenaustausch auf die von STEP zur Verfügung gestellten Implementationsmethoden SPF und SDAI zurückgegriffen.

Die in dieser Kategorie bisher vorgestellten Ansätze stellen hochkomplexe und leistungsfähige Integrationsumgebungen dar, welche bei entsprechender umfassender Realisierung alle geeignet sind, die in Abschnitt 4.2 aufgeführten Forderungen zu unterstützen.

Nachteilig bzw. problematisch wirkt sich in diesem Zusammenhang jedoch die Verwendung der STEP- bzw. IFC-Standards aus. Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 dargestellt, sind diese Standards derart komplex und umfangreich, daß erstens ein Nachvollziehen der Konvertierlogik fast unmöglich ist und daraus zweitens ein enormer Implementationsaufwand resultiert, welcher Modelländerungen und die anschließende Anpassung der Implementationen praktisch ausschließt.

Neben der Definition der Partialmodelle erfordert der beschriebene Ansatz (Partialmodelle + neutrales Modell) die Definition eines zusätzlichen, zwar herstellerneutralen, speziell im Rahmen lebenszyklusbetrachtender Integrationsversuche

aber dennoch hochkomplexen integrierenden Modells. Durch die doppelte Datenerhaltung in den verschiedenen Modellen und die damit verbundene Redundanz entstehen Probleme hinsichtlich der Datenaktualität und -konsistenz sowie hinsichtlich der Lösung auftretender Konflikte zwischen den Partialmodellen und dem neutralen Modell.

Aus den beschriebenen Problemen der bisherigen Ansätze resultieren die Überlegungen zur Untersuchung, Konzeption und Realisierung des in dieser Arbeit aufgestellten und verwendeten verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellansatzes. Im folgenden Abschnitt wird dessen Architektur diskutiert und bewertet.

## 4.4 Architektur

Ausgehend von der Analyse existierender Forschungsprojekte (s. Abschnitte 4.3.2) hinsichtlich der Konzeption und Realisierung der Modellintegration und der Diskussion verschiedener Modellarchitekturen (s. Abschnitt 3.2.2) können folgende Ergebnisse zusammenfassend dargestellt werden:

- Auf Grund der enormen Gesamtkomplexität der im Bauwerkslebenszyklus auftretenden Daten und Informationsanforderungen ist die Definition eines neutralen globalen Bauwerksmodells im Rahmen einer zentralen Bauwerksmodellarchitektur zur direkten Integration beliebiger Fachapplikationen unmöglich.
- Die Klassifizierung der Datengesamtheit in domänenspezifische Partialmodelle ist erforderlich, um von der Vielzahl existierender überwiegend proprietärer Applikationsmodelle zu abstrahieren und um damit die Anzahl der Kommunikationswege (Mappings / Schnittstellen) zwischen dem nunmehr verteilten Bauwerksmodell und den Fachapplikationen drastisch zu senken.
- Der dynamische Prozeßcharakter des Bauwerkslebenszyklusses und die daraus resultierenden Informationsanforderungen bedingen einen dynamisch modifizierbaren Verbund bestehend aus dynamisch adaptierbaren Partialmodellen.
- Eine auf Basis von Partialmodellen rein dezentral organisierte Bauwerksmodellarchitektur bietet nur unzureichende Möglichkeiten hinsichtlich der Koordination der kooperativen Aspekte im Bauwerkslebenszyklus. Die Koordinierung erfordert domänenübergreifende Integrationsmechanismen im Rahmen einer resultierenden hybriden Bauwerksmodellarchitektur.
- Ein zentrales, übergeordnetes, die Partialmodelle integrierendes Bauwerksmodell (Kernmodell) als Etablierung einer Verständigungsebene zur Realisierung einer koordinierten Kommunikation und Kooperation stellt sich

ebenfalls als inadäquat heraus. Ein solches zusätzliches neutrales Modell birgt beträchtliche Probleme hinsichtlich der Datenkonsistenz und läßt sich lebenszyklusweit in der Regel nur durch komplexe Standardisierungsansätze definieren, woraus wiederum ein entscheidender Mangel an Flexibilität hinsichtlich der Einbeziehung der dynamischen Anforderungen an das Gesamtbauwerksmodell resultiert.

- Die potentielle Dynamik der jeweiligen Partialmodelle und des Gesamtbauwerksmodellverbundes erfordern hochgradig flexible Mechanismen zur Etablierung und Aufrechterhaltung einer adäquaten Verständigungsplattform innerhalb des Modellverbundes auf operativer Basis.

Aus diesen Erkenntnissen schlußfolgernd wird für den verknüpfungsbasierten Ansatz eine hybride Modellarchitektur vorgeschlagen. Diese hybride Architektur konstituiert sich im Sinne eines Modellverbundes aus einer dynamisch variierbaren Menge domänenspezifischer Partialmodelle und einer zentralen koordinierenden Komponente (s. Abbildung 4.6).

HYBRIDE  
MODELL-  
ARCHITEKTUR:  
DESKRIPTIVE  
DOMÄNEN-  
MODELLE +  
OPERATIVER  
VER-  
KNÜPFUNGS-  
MECHANISMUS

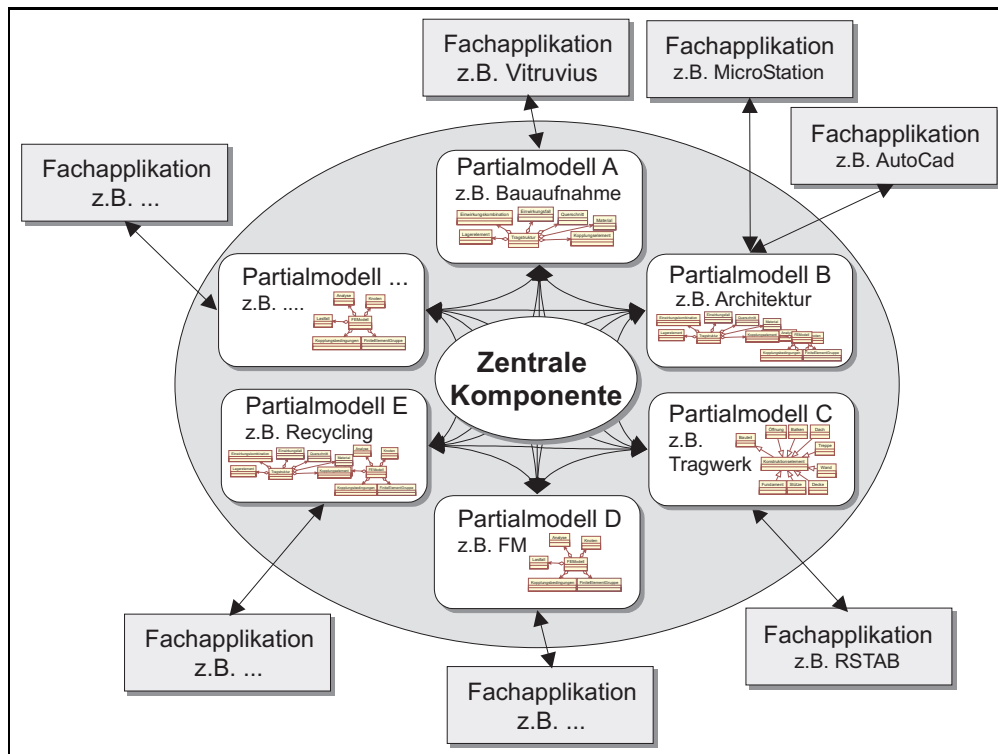


Abbildung 4.6: Logische Architektur des verknüpfungsbasierten Ansatzes

Die Partialmodelle sind dynamisch modifizierbar und entsprechend den aktuell vorliegenden Informationsanforderungen untereinander verknüpft. Bei der zentralen Komponente handelt es sich nicht um ein neutrales integriertes Modell, sondern um eine Verwaltungskomponente, welche, basierend auf den Verknüpfungen,

die koordinierte Kooperation und Kommunikation zwischen den Partialmodellen realisiert (s. Abschnitt 4.6).

Auf Basis dieser Architektur bietet der verknüpfungsbasierte Modellierungsansatz grundlegende Lösungskonzepte für die zu Beginn des Kapitel aufgeführten Anforderungen. Speziell die Konstitution eines dynamisch variierbaren Modellverbundes aus laufzeitdynamisch modifizierbaren Partialmodellen unterstützt wesentlich die Zielstellungen nach hard- und softwareunabhängigem Datenzugriff (1,2) sowie die Forderung nach planerischer Freiheit(3).

Das über Verknüpfungen explizit zu definierende und jederzeit adaptierbare Beziehungsgefüge zwischen den Modellen und Daten der jeweiligen Domänen ermöglicht den kontextbezogenen, modellübergreifenden Datenzugriff (1) und bietet grundlegende Ansätze sowohl zur Konsistenzsicherung (4) als auch zur Bereitstellung eines Änderungs- bzw. Projektmanagements (5,6,7).

In Abschnitt 4.5 wird weiterhin nachgewiesen, daß die vorgeschlagene Gesamtmodellarchitektur in Verbindung mit dem flexiblen Verknüpfungsansatz geeignet ist, die in Abschnitt 4.2 gestellten Forderungen hinsichtlich einer adäquaten Mappingarchitektur zu erfüllen.

## 4.5 Verknüpfungen

Die existierende Partialmodellkohärenz (s. Abschnitt 4.1) wird im vorliegenden Ansatz nicht durch ein neutrales übergeordnetes Kernmodell abgebildet (vgl. Abschnitt 4.4). Diese Aufgabe kommt hier den Verknüpfungen zu.

Die Verknüpfungen müssen demnach in der Lage sein, die in Abschnitt 4.1 genannten und im letzten Abschnitt noch einmal dargestellten Problemstellungen zu bewältigen.

Basis der dort geforderten Modellüberführungen bzw. -generierungen zur Realisierung eines effizienten Daten- und Informationsaustausches ist ein geeignetes Mapping zwischen den domänenspezifisch differierenden Repräsentationen prozeßübergreifend kohärenter Daten(-strukturen) der jeweiligen Partialmodelle des Bauwerksmodells.

Die zu erstellenden Verknüpfungen zwischen den Partialmodellelementen (s. Abbildung 4.2) müssen die Verständigung und somit die effiziente Abwicklung der Informationsanforderungen zwischen den zu integrierenden Partialmodellen gewährleisten.

In Abschnitt 4.2 wurde bereits darauf hingewiesen, daß sich die zu verknüpfenden Partialmodelle sehr stark hinsichtlich der Strukturierung und der Semantik der Daten unterscheiden. Dieser Sachverhalt hat entscheidenden Einfluß auf die Charakteristik der zu erstellenden Verknüpfungen.

### 4.5.1 Strukturelle und semantische Differenzen

Bei der verknüpfungsbasierten Abbildung bzw. Beschreibung der Kohärenz der Partialmodelle werden Verknüpfungen zwischen den Modellelementen der jeweiligen Partialmodelle zur Überwindung der Modelldifferenzen erstellt. Hinsichtlich dieser Differenzen lassen sich prinzipiell zwei Kategorien identifizieren.

**Strukturbezogene Differenzen** Diese Kategorie adressiert Modellunterschiede bei der Verknüpfungsspezifikation, welche sich auf die Art und die Kardinalität der verwendeten Modellelemente beziehen.

Im Rahmen des hier zu diskutierenden Ansatzes objektorientierter Partialmodelle werden auf Bauwerksmodellebene die Elemente *Klasse* und *Attribut* und resultierend auf Bauwerksmodelldatenebene die korrespondierenden Elemente *Instanz* und *Attribut(wert)* betrachtet und deren Beziehungen durch Verknüpfungen abgebildet. Die möglichen Verknüpfungen zwischen den Elementen auf Bauwerksmodelldatenebene illustriert Abbildung 4.7.

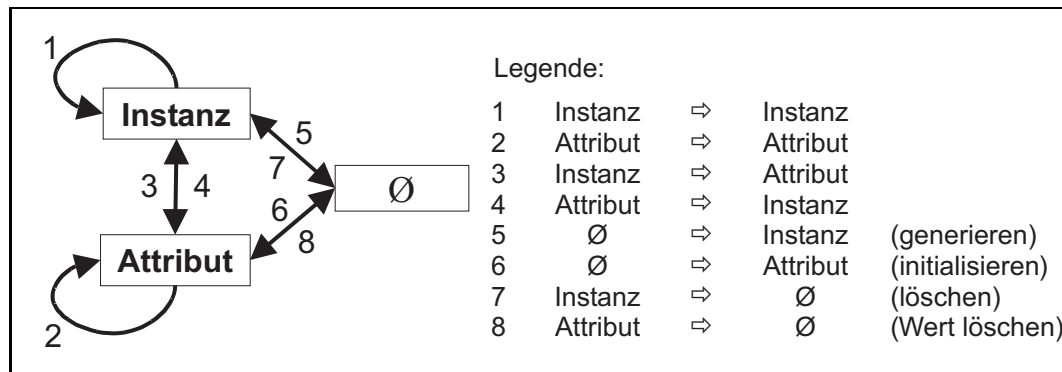


Abbildung 4.7: Mappingprimitive nach [Bij95]

Neben der Art der zu verknüpfenden Modellelemente spielt deren Anzahl pro Verknüpfung, also deren Kardinalität, ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Verknüpfungsspezifikation.

Die Kardinalität der verknüpften Elemente kann dabei folgende Werte annehmen:

**0** Die Kardinalität 0 bedeutet, daß ein Element entweder im Quell- oder im Zielmodell nicht vorhanden ist<sup>4</sup>. Die Konsequenz der Kardinalität 0 bei der Abarbeitung der Verknüpfung kann der Legende in Abbildung 4.7 entnommen werden.

**1** Mit Kardinalität 1 wird ausgedrückt, das vom entsprechenden Modellelement genau ein Exemplar verknüpft wird.

<sup>4</sup>Eine Verknüpfung der Kardinalität 0 : 0 ist unzweckmäßig.

**C,B** C und B stehen hier stellvertretend für eine beliebige aber konstante Anzahl von Exemplaren der verknüpften Elemente.

**N,M** Wie gemein hin üblich wird auch hier mit den Buchstaben N und M eine variable Anzahl zu verknüpfender Modellelemente bezeichnet.

Somit ergeben sich für die strukturorientierten Verknüpfungen folgende in der Tabelle 4.2 dargestellten möglichen Kombinationen hinsichtlich Art und Kardinalität der zu verknüpfenden Modellelemente.

	Inst→Inst	Attr→Attr	Inst→Attr	Attr→Inst
1 : 0	•	•	•	•
0 : 1	•	•	•	•
1 : 1	•	•	•	•
1 : C	•	•	•	•
C : 1	•	•	•	•
C : B	•	•	•	•
1 : N	•			•
N : 1	•	•		•
C : N	•			•
N : C	•		•	
N : M	•			

Tabelle 4.2: Strukturelle Verknüpfungen nach Amor [Amo97]

Zur Realisierung der oben geforderten Verständigung bzw. Harmonisierung müssen die Verknüpfungen demnach in der Lage sein, alle die in der Tabelle gekennzeichneten Kombinationen abzubilden.

**Semantikabhängige Differenzen** Diese Kategorie subsumiert die durch unterschiedliche domänenspezifische Kontexte, Sichtweisen, Vorlieben und verschiedene Modellierungsziele entstehenden Modelldifferenzen. Speziell in Abhängigkeit der verschiedenen Anwendungskontexte und der Modellierungsziele ergeben sich erhebliche Differenzen im Abstraktionsgrad, bei den verwendeten Begrifflichkeiten und in der Detaillierung der erstellten Partialmodelle.

Wasmer [Was97] gibt hierzu eine sehr ausführliche Darstellung der möglichen zu überwindenden Konflikte, welche hier überblicksartig wiedergegeben werden:

**Überschneidung der Begriffsumfänge** Trotz gleichartiger Klassifizierung von Entwurfsobjekten unterschiedlicher Domänen ist es möglich, daß die entsprechenden Instanzen der jeweiligen Klassen nicht ineinander überführt werden können, da sie vollkommen getrennte Entwurfsobjekte repräsentieren. Dies läßt sich auch für den umgekehrten Fall konstatieren, indem

äquivalente Instanzen verschiedener Domänen unterschiedlich klassifiziert sind, und somit keine Übereinstimmung erkannt wird.

**Merkmalskonflikte** Gleiche Entwurfsobjekte werden je nach Anwendungskontext und Zweck des Partialmodells durch unterschiedliche (im Kontext der spezifischen Domäne relevante) Merkmale bzw. Attribute beschrieben.

**Strukturkonflikte** Diese Konflikte entstehen, wenn Eigenschaften von Entwurfsobjekten einerseits als direkte Attribute von Klassen modelliert werden, die gleichen Eigenschaften in einem zweiten Modell jedoch als Beziehungen zu anderen Klassen abgebildet werden. Hierbei entstehen vor allem Probleme hinsichtlich der Identität von Instanzen, wenn diese auf direkte Attribute abgebildet oder ihrerseits aus Attributen generiert werden. Auf Grund unterschiedlicher Detaillierungsgrade der Modelle verschärft sich dieser Konflikt, wenn ein direktes Attribut einer Klasse in einem anderen Modell erst über eine möglicherweise mehrstufige Hierarchie von assoziierten Klassen erreichbar ist. Bei der Überführung zwischen den Modellen müssen jedoch alle Instanzen im Zielmodell zunächst erzeugt bzw. im entgegengesetzten Fall durchlaufen werden.

**Namenskonflikte** Namenskonflikte ergeben sich durch die Verwendung unterschiedlicher Terminologien, die sich in der Verwendung von Homonymen<sup>5</sup> oder Synonymen<sup>6</sup> niederschlagen. Das sich ergebende Problem besteht dann im Auffinden der äquivalenten Klassen.

**Datentypkonflikte** Letztlich müssen auch unterschiedliche Datentypen beachtet bzw. korrekt überführt werden. Hierzu zählen insbesondere auch nutzerdefinierte attributspezifizierende Vorgaben wie Maßeinheiten.

Die in dieser Kategorie genannten Modelldifferenzen stellen die eigentliche Problematik bei der Realisierung einer mappingorientierten Verständigungsplattform zwischen unterschiedlichen Partialmodellen dar.

Das entscheidende Problem liegt im Erkennen der semantischen Differenzen bzw. Übereinstimmungen (Äquivalenzen) zwischen den Modellelementen [Pfe98]. Sind diese einmal identifiziert, kann mit Hilfe der strukturellen Verknüpfungen die Überführung der Daten (d.h. das Erzeugen und Zuordnen von Instanzen und das Setzen von Attributwerten) zwischen den Partialmodellen realisiert werden. Insgesamt ist es dabei prinzipiell unerheblich, ob die zu etablierende Verständigung auf einem integrierten Modell (Zusammenführung verschiedener Modelle) oder auf Mappings zwischen den Partialmodellen (Überführungen zwischen Modellen) basiert. Der Überführungsansatz bietet allerdings den Vorteil, nicht komplette Modelle in Einklang bringen zu müssen, sondern lediglich das Generieren der

HAUPTPROBLEM  
DES MODELL-  
MAPPINGS:  
SEMANTISCHE  
DIFFERENZEN

<sup>5</sup>gleicher Begriff aber unterschiedliche Bedeutung

<sup>6</sup>unterschiedliche Begriffe gleicher Bedeutung



entsprechenden Instanzen und das korrekte Setzen der Attributwerte pro Modell zu garantieren [Amo97].

Das Herausfinden der semantischen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Modellelementen ist ein derzeit nur sehr begrenzt automatisierbarer Vorgang. Gerade durch die Kombination bzw. das gemeinsame Auftreten der oben beschriebenen Differenzen ist die semantisch eindeutige Zuordnung verschiedener Modellelemente, selbst bei ausführlicher Dokumentation, ein äußerst diffiziler Prozeß, zu dessen Bewältigung enorme Fachkenntnisse der speziellen Domänen notwendig sind. Es ist bisher nicht gelungen, dieses Wissen für eine rechnergestützte automatische Modellüberführung umfassend zu formalisieren und bereitzustellen.

Aus diesen Gründen werden Modellmappings meist händisch durch spezielle kompetente Beteiligte (Integratoren [KPP97a]) beschrieben. Sind die Mappings einmal identifiziert, formalisiert und implementiert, können anschließend Überführungen oder auch Konsistenzüberprüfungen bzw. Änderungspropagationen zwischen den einzelnen Modellen realisiert werden.

Auch dem verknüpfungsbasierten Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß es derzeit nicht möglich ist, allein auf der Beschreibung der Partialmodelle beruhend, automatisch Mappings zwischen den Modellen zu etablieren. Dieser Sachverhalt resultiert insbesondere aus der Domänenspezifik der Partialmodelle und der ausdrücklichen Einbeziehung und Verwaltung der Modelldynamik, wodurch semantische Differenzen nicht auszuschließen sind.

UMFASSENDES  
AUTOMATI-  
SCHES  
MAPPING  
UNMÖGLICH

Die Aufgabe der Mappingbeschreibung und damit auch die der Verknüpfungsspezifikationen obliegt demnach den innerhalb der Domänen (administrativ - generalistisch integrativ) tätigen Fachplanern. Sie verfügen über das notwendige Fachwissen der speziellen Domänen, in denen sie tätig sind bzw. von denen sie Informationen benötigen, und nur sie können zur Laufzeit auf auftretende Modell- und Datenänderungen adäquat reagieren.

### 4.5.2 Definition und Spezifikation

Bei der hier zu diskutierenden verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierung werden, wie bereits im letzten Abschnitt erwähnt, die Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen auf der Ebene der Fachplaner erstellt. Nur dieser Ansatz garantiert dem Fachplaner größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der Einbeziehung der von ihm benötigten bzw. für ihn in irgendeiner Form relevanten Informationen.

Diese These wird bereits durch verschiedene Forschungsarbeiten unterstützt. Stellvertretend seien hier Schneider [Sch00], welcher die aktive Beteiligung des Anwenders zur Realisierung der Integration verschiedener Fachapplikationen fordert:

*Die aktive Beteiligung des Anwenders verändert den Charakter des Integrationsprozesses vom automatischen in einen interaktiven Vorgang. Der Integrationsprozeß wird dadurch der traditionellen Arbeitsweise des Anwenders ohne Integrationssoftware ähnlicher. ... Der Anwender hat demnach in diesem Integrationsansatz die Aufgabe, den Integrationsprozeß zu kontrollieren und zu steuern.*

und Augenbroe et al [ARV98] genannt, welche ebenfalls den anwendergesteuerten Datenaustausch zwischen semantiktragenden Teilmodellen favorisieren:

*User driven mappings accomplish the data exchange across semantic clusters. It is accepted, even deemed efficient to aim for less than absolute integrity in the communication between semantic clusters.*

Die Dynamikunterstützung innerhalb des verknüpfungsbasierten Ansatzes erfordert eine dynamische Verknüpfungsdefinition und -spezifikation, um auf zur Laufzeit erfolgende Modelländerungen adäquat reagieren zu können. Demnach muß die Möglichkeit bestehen, Verknüpfungen zwischen Modellen und Daten zu erstellen, welche zu Projektbeginn nicht bekannt waren (beispielsweise infolge der Einbeziehung eines weiteren kompletten Partialmodells oder der Erweiterung eines Partialmodells).

Schlußfolgernd ist nur ein anwendergesteuertes Verknüpfungsmanagement, welches es erlaubt, Verknüpfungen dynamisch zur Laufzeit zu erstellen und zu modifizieren in der Lage, adäquat auf Änderungen zur Laufzeit des Projektes (während der Erledigung der zu bewältigenden Planungsaufgaben) zu reagieren. Nur dadurch kann ein umfassender stets aktueller Informationsaustausch zwischen den Partialmodellen realisiert werden.

Zu diesem Zweck wird ein auf Basis des oo-Paradigmas beruhendes Framework entwickelt und den Beteiligten zur Formulierung der Verknüpfungen zur Verfügung gestellt.

Korrespondierend zur im Kapitel 3, Abschnitt 3.1.2 geführten Diskussion zur Klassifizierung von Entwurfsobjekten zur Komplexitätsreduktion von Bauwerksmodellen, müssen auch die Beziehungen zwischen den Entwurfsobjekten der unterschiedlichen Domänen auf Modellebene zunächst beschrieben werden, ehe sie auf Modelldatenebene ausgeprägt werden können (s. Abbildung 4.8).

OO-BASIERTES  
FRAMEWORK  
ZUR VER-  
KNÜPFUNGSDE-  
FINITION UND  
-SPEZIFIKATION

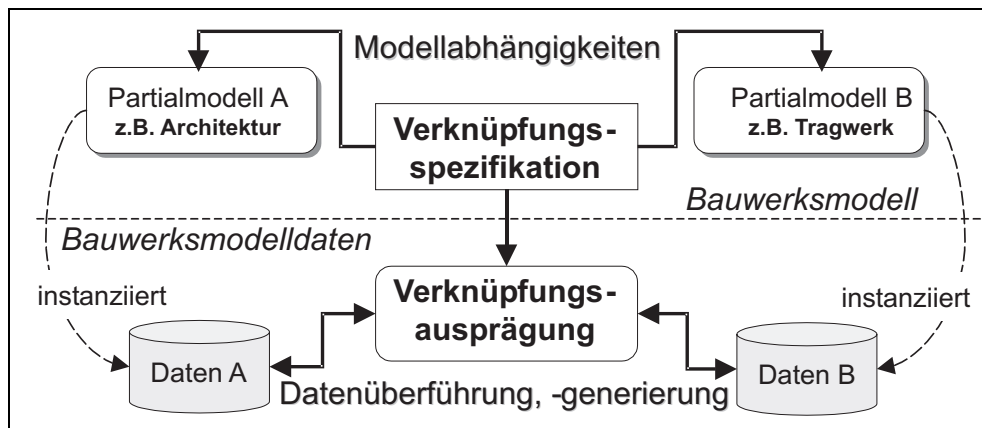


Abbildung 4.8: Verknüpfungsspezifikation

Ein klassifikationslose Abbilden der domänenübergreifenden Beziehungen zwischen den Entwurfsobjekten ist aus Komplexitätsgründen gleichfalls praktisch nicht handhabbar und extrem ineffizient.

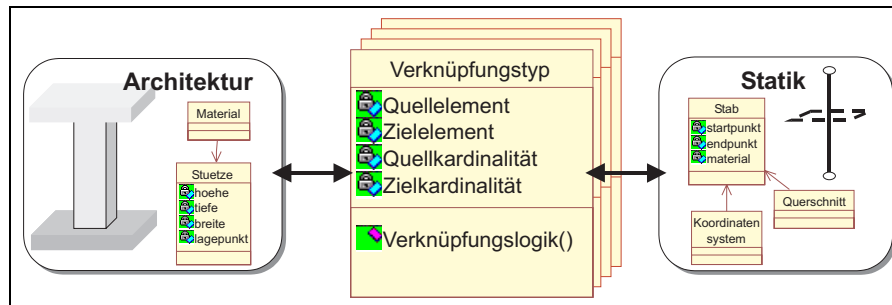


Abbildung 4.9: Verknüpfungstyp

Demnach beinhaltet das bereitgestellte Framework die Beschreibung spezifischer Verknüpfungstypen (Klassen), welche Elementtypen verschiedener Partialmodelle in Beziehung setzen. Die Verknüpfungstypen legen dabei den Typ und die Kardinalität der in Beziehung stehenden Elemente (vgl. Abschnitt 4.5.1) und die Verarbeitungslogik der Verknüpfung fest (s. Abbildung 4.9).

Im Sinne der in Abschnitt 4.2 formulierten Forderungen ist es dabei durchaus möglich, Verknüpfungen zu definieren, welche Quellelemente mehrerer verschiedener Domänen in Zielelemente einer Domäne überführen. Die Abbildung 4.10 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Hier werden beispielsweise Elemente aus den Domänen Architektur und Bauwerksdiagnose durch eine Verknüpfung in ein Element der Domäne Tragwerksplanung überführt. Die tatsächliche Ausprägung von Verknüpfungen (Instanzen) geschieht durch die Instanziierung der Verknüpfungstypen des Frameworks und die entsprechende Zuordnung konkreter Partialmodelldaten.

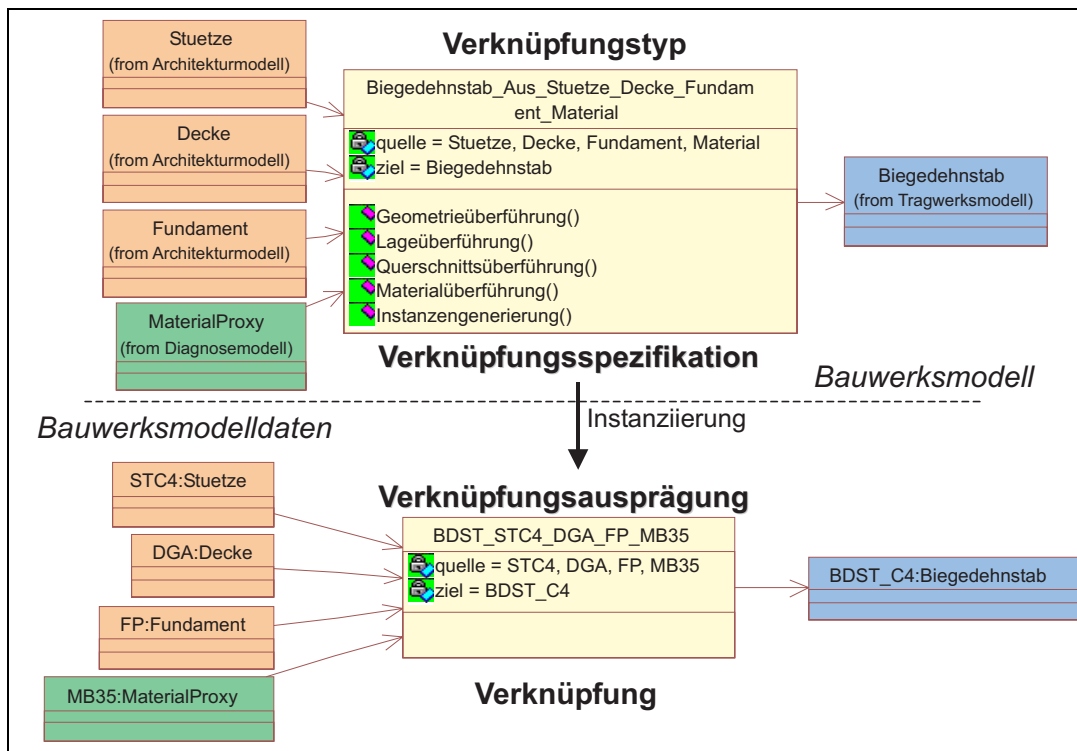


Abbildung 4.10: Ausprägung von Verknüpfungen aus Verknüpfungstypen

### 4.5.3 Kategorien

Entsprechend ihren verschiedenen Aufgaben und Zielstellungen können die Verknüpfungen in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie umfaßt Verknüpfungen, welche informierenden Charakter im Sinne eines Notifikations- bzw. Änderungserkennungsmanagements tragen und damit den Informationsaustausch zwischen den Beteiligten unterstützen.

Die zweite Kategorie von Verknüpfungen dient der direkten datenbezogenen Manipulation der Partialmodelle.

**Informierende Verknüpfungen** Zur Sicherstellung konsistenter Planungs- beziehungsweise Bearbeitungsstände ist es notwendig, die Beteiligten über evtl. auftretende für sie relevante Änderungen im Gesamtdatenbestand zu informieren. Dabei resultieren speziell aus der Verwendung eines dynamischen Bauwerksmodellansatzes folgende zu überwachende und demnach durch Verknüpfungen zu hinterlegende Modell- und Datenänderungen:

- Existenz<sup>7</sup> von Partialmodellen im Gesamtsystem
- Existenz von Klassen, Instanzen und Attributen in Partialmodellen

<sup>7</sup>Mit Existenz werden in dieser Aufzählung abkürzend die Ereignisse Generieren und Entfernen entsprechender Elemente zusammengefaßt.

- Wertänderung von Attributen

Diesbezüglich werden durch informationsbezogene Verknüpfungen Quellelemente spezifiziert, welche auf oben genannte Änderungsereignisse hin überwacht werden. Zusätzlich zeichnen sich die informierenden Verknüpfungen durch verschiedene weitere Parameter, wie z.B. Randbedingungen in Form von Grenz- bzw. Schwellwerten aus, welche die resultierende Notifikation bzw. deren Priorität beeinflussen [Böh01] (s. Abbildung 4.11).

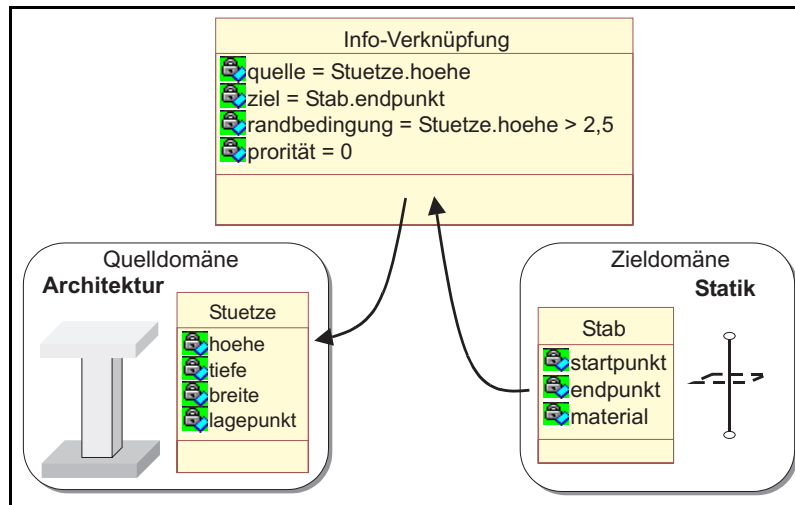


Abbildung 4.11: Beispiel einer informierenden Verknüpfung

**Datenmanipulierende Verknüpfungen** Diese Art von Verknüpfungen kann wiederum in generierende und propagierende Verknüpfungen unterteilt werden.

Die generierenden Verknüpfungen dienen dem initialen Ausprägen von Partialmodelldaten (Erstellen von Zielelementen) entsprechend den verknüpften Ausgangselementen und der diesbezüglich in der Verknüpfung festgelegten Verarbeitungs- bzw. Überführungslogik.

Sie stellen in ihrer Spezifikation, Anwendung und Verwaltung die komplizierteste Verknüpfungsart dar, da sie partiell durch eine große Anzahl in Beziehung zu setzender Quell- und Zielmodellelemente und möglicherweise sehr komplexe Überführungs- bzw. Transformationsalgorithmen charakterisiert sind.

Die generierenden Verknüpfungen werden ebenfalls durch Instanziierung aus verfügbaren Verknüpfungstypen gebildet. Dabei können sie sich aus verschiedenen Teilverknüpfungen konstituieren.

Die propagierenden Verknüpfungen nehmen eine Art Zwitterstellung zwischen informierenden und generierenden Verknüpfungen ein. Sie setzen kor-

respondierend zu den informierenden Verknüpfungen existierende Elemente in Beziehung, wobei die Quellelemente auf relevante (spezifizierte) Änderungen überwacht werden. Das Ziel der propagierenden Verknüpfungen liegt jedoch nicht in der bloßen Notifikation eingetretener Änderungen, sondern in der direkten datenbezogenen Manipulation der verknüpften Zielelemente, d.h. infolge auftretender Änderungen im Quellmodell werden die verknüpften Zielmodellelemente bzw. Werte entsprechend der in der Verknüpfung spezifizierten Überführungslogik manipuliert (z.B. Ändern von Werten, Löschen von Elementen).

Diese verschiedenen Arten von Verknüpfungstypen und die daraus instanziierten Verknüpfungen bedingen auch unterschiedliche adäquate Konzeptionen hinsichtlich ihrer Erstellung, Abarbeitung und Verwaltung. Diese werden ausführlich in Kapitel 5 diskutiert.

## 4.6 Zentrale Komponente

In den Abschnitten 3.2.2 und 4.4 wurde bereits konstatiert, daß ein rein dezentral organisiertes Gesamtbauwerksmodell die folgenden entscheidenden Schwächen hinsichtlich kooperativer und kommunikativer Aspekte offenbart [WH00]:

- geringer integrativer Charakter
- wenig Konsistenzsicherungsmöglichkeiten
- Versionierung eines „Gesamtdatenbestandes“ problematisch
- kaum Koordinationsmöglichkeiten.

Der hybride Charakter des vorliegenden verknüpfungsbasierten Ansatzes, welcher sich zur Lösung der oben genannten Probleme anbietet, dokumentiert sich in der Etablierung einer zentralen Komponente.

Die hier vorgeschlagene zentrale Komponente stellt eine Navigationsebene dar, mit deren Hilfe das Navigieren im bzw. Explorieren des Gesamtdatenbestandes unterstützt wird.

Die Hauptaufgabe der Navigationsebene besteht demnach darin, den Beteiligten alle zur Verfügung stehenden Daten der aktuell im Bauwerksmodellverbund involvierten Partialmodelle zur Verfügung zu stellen. Dadurch besteht die Möglichkeit, die jeweiligen Partialmodelle zu analysieren.

Diese Analyse bildet die fachliche Grundlage der Verknüpfungstypdefinition bzw. Verknüpfungsspezifikation. Entsprechend des dynamischen Charakters der Partialmodelle und des Partialmodellverbundes (vgl. Abschnitte 3.4.1 und 3.4.2) muß

diesbezüglich sowohl das Analysieren (Navigieren in) der Bauwerksmodellebene als auch der Bauwerksmodelldatenebene möglich sein.

Auf Basis der von den Beteiligten erstellten Verknüpfungen wird ein domänenübergreifendes Navigieren durch den Gesamtdatenbestand gewährleistet. Auf Grund und entlang dieser Verknüpfungen können verschiedene Informationen wie:

- Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Repräsentationen von Entwurfsobjekten
- unterschiedliche Planungsstände von Entwurfsobjekten
- Menge der Domänen in denen ein Entwurfsobjekt bearbeitet wird
- an einem Entwurfsobjekt arbeitende Fachplaner

bereitgestellt werden. Zu diesem Zweck muß die Navigationsebene sämtliche Verknüpfungen zwischen den Modellen und Daten verfolgen können. Auf diesen Aspekt wird aus verwaltungstechnischer Sicht in Kapitel 5 genauer eingegangen.

## 4.7 Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich die Architektur und die Art der Abbildung der Partialmodellkohärenz im Rahmen des hier konzipierten verknüpfungsbasierten Modellierungsansatzes wie folgt charakterisieren:

Das Mapping zwischen den domänenspezifisch differierenden Repräsentationen prozeßübergreifend kohärenter Daten(-strukturen) basiert auf Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen des Bauwerksmodells. Die zu erstellenden Verknüpfungen zwischen den Partialmodellelementen gewährleisten die Verständigung und somit die Abwicklung der prozeß- und phasenübergreifenden Informationsanforderungen zwischen den zu integrierenden Partialmodellen.

**Ansatz:**  
HARMONISIERUNG  
DER MODELL-  
INHALTE  
BASIEREND AUF  
VERKNÜPFUN-  
GEN

Die verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierung stellt einen hochflexiblen, dynamisch orientierten Ansatz zur Etablierung einer lebenszyklusumfassenden Integration der beteiligten Fachplaner und Fachapplikationen dar.

Die zugrundeliegende hybride Modellauffassung ist durch die zentral koordinierte Verknüpfungsstruktur zwischen prinzipiell dezentral organisierten Partialmodellen charakterisiert. Dadurch ist die Modellarchitektur des verknüpfungsbasierten Ansatzes geeignet, die Integration hinsichtlich der in Abschnitt 4.1 geforderten kooperativen und kommunikativen Aspekte zu unterstützen.

Mit Hilfe des zur Laufzeit anwenderspezifisch interaktiv entwickelten expliziten Beziehungsgefüges wird eine adäquate, den in Abschnitt 4.2 spezifizierten Anforderungen gerechte Verständigung (Mapping) innerhalb des variierbaren Verbundes dynamisch modifizierbarer Partialmodelle realisiert.

Auf Basis dieser Verständigung ist eine Unterstützung der Kooperation der Beteiligten im Sinne eines inkrementellen Datenaustausches und Modellabgleiches zwischen den Partialmodellen gegeben.

Speziell die Konzeption des dynamisch interaktiv adaptier- und modifizierbaren Beziehungsgefüges stellt ähnlich der Abbildung der Dynamik auf Partialmodellebene erhebliche Anforderungen an die Verwaltungskomponente des verknüpfungsbasierten Ansatzes.

Deshalb werden in Kapitel 5 ausführlich verwaltungstechnische Aspekte bezüglich der Verknüpfungserstellung, -speicherung und -bearbeitung diskutiert. Einen weiteren Fokus des folgenden Kapitels bildet die Verwendung der Verknüpfungen für die koordinierenden Aufgaben der zentralen Komponente.



# Kapitel 5

## Verknüpfungsmanagement

Im Kapitel 4 wurde der verknüpfungsbasierte Ansatz hinsichtlich seiner Architektur (s. Abschnitt 4.4) und der Spezifik der Verknüpfungen (s. Abschnitte 4.5.2 und 4.5.3) diskutiert. Diese Ausführungen ergänzend widmet sich dieses Kapitel der Darstellung der entwickelten Konzepte zur Erstellung, Speicherung, Abarbeitung und damit insgesamt der Verwaltung der Verknüpfungen.

Zu diesem Zweck werden zunächst grundlegende, aus dem Kontext der Integration im Bauwerkslebenszyklus resultierende Aussagen zu spezifischen Rahmenbedingungen und entsprechenden Anforderungen an eine Verknüpfungsverwaltungskomponente formuliert.

Danach werden die einzelnen Kategorien von Verknüpfungen detailliert im Sinne ihrer Verwaltung und Abarbeitung vorgestellt, bevor abschließend eine Gesamtdarstellung und Bewertung der Verknüpfungsverwaltung erfolgt.

### 5.1 Grundlagen

In den vorangegangenen Kapiteln (s. Abschnitte 1.1, 2, 2.1 und 3.2.1) wurde nachgewiesen, daß die aktuellen Arbeitsorganisationsformen im Bauwesen, speziell innerhalb der Bauplanung, die dezentrale Verteilung und die hard- und softwarespezifische Verwaltung der Partialmodelle bedingen.

Bezüglich der informationstechnischen Verwaltung und Abarbeitung der Verknüpfungen lassen sich zusammenfassend folgende Merkmale des dem verknüpfungsbasierten Ansatz zugrundeliegenden Systems (s. Abbildung 5.1) identifizieren [WHBF01]:

- räumlich - geographisch getrennte Datenhaltung
- zeitlich variante Informationsanforderungen
- differenzierte Modellstrukturen und Sprachen

**Situation:**  
SYSTEMCHARAKTER  
DES VER-  
KNÜPFUNGSBA-  
SIERTEN  
ANSATZES:  
KOMPLEX,  
DYNAMISCH,  
VERTEILT

- unterschiedliche Zugriffs- und Verwaltungsfunktionalität
- diverse Hard- und Softwareumgebungen.

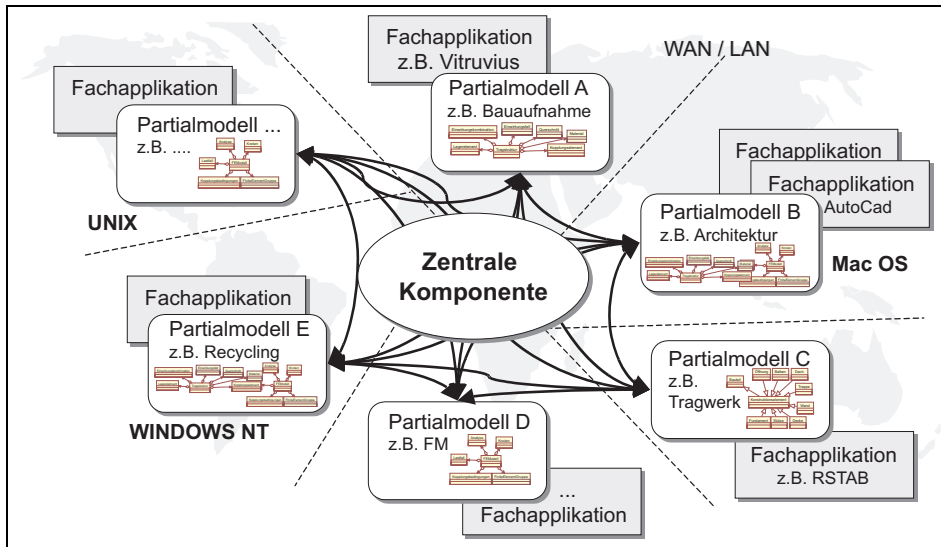


Abbildung 5.1: Verteiltes Gesamtsystem

Diese Systemeigenschaften gepaart mit arbeitsorganisatorischen Anforderungen (z.B. zumindest temporäre Eigenständigkeit und Entscheidungsfreiheit der Fachplaner trotz globaler Teamarbeit) führen zu einem verteilten System, welches besondere Ansprüche an die Organisation und Koordination der Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten stellt.

An dieser Stelle sei ausdrücklich vermerkt, daß der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Untersuchung und Anwendung prinzipieller kooperations- bzw. kommunikatonsunterstützender Methoden und Techniken etwa aus dem CSCW- oder Groupwarebereich liegt.

Im Rahmen der Entwicklung und Diskussion der verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierung wird hier ausschließlich ein adäquater Ansatz zur logischen und technischen Abbildung und Verwaltung der Verknüpfungen als Basis der Kooperation und Kommunikation zwischen den Beteiligten angestrebt. Diesbezüglich weiterführende Methoden und Verfahren zur Gestaltung einer effizienten Gruppen- bzw. Teamarbeit werden beispielsweise in [HHS00] und [HH00] vorgeschlagen.

Durch den vorliegenden verknüpfungsbasierten Ansatz finden neben dem allgemeinen Zugriff auf die verteilt vorliegenden Daten und einem entsprechenden Datenaustausch vor allem Aspekte der asynchronen Kooperation Unterstützung. Die asynchrone Kooperation ist ein wesentliches Mittel zur Gewährleistung der prinzipiell eigenständigen Arbeitsweise der Fachplaner und bedeutet, daß Informationsanforderungen spezifiziert und initiiert werden, die erwarteten Resultate

jedoch zeitversetzt oder erst nach Eintreten bestimmter Ereignisse geliefert bzw. zur Verfügung gestellt werden [HH00].

Dies impliziert neben dem reinen Datenaustausch in erster Linie die Etablierung eines Informationssystems basierend auf der Unterstützung entsprechender Notifikationen und Propagationen domänenübergreifend relevanter Datenänderungen.

Die beschriebene Spezifik des Gesamtsystems (vgl. auch Abschnitte 3.4 und 4.4) und die diesbezüglich oben formulierten kooperativen Zielstellungen erfordern demnach eine Verknüpfungsverwaltung, welche folgenden Aufgaben gerecht wird:

- Laufzeitdynamische Aktualisierung des Bauwerksmodellverbundes
- Realisierung der Zugriffsmöglichkeit auf involvierte entfernte Partialmodelle
- Datenaustausch zwischen den Partialmodellen
- Notifikation und Propagation von Modell- und Datenänderungen
  - Spezifikation von Verknüpfungstypen und Verknüpfungen
  - Abarbeitung von Verknüpfungen
  - Überwachen und Erkennen von Modell- und Datenänderungen in Partialmodellen
- Persistente projektübergreifende Speicherung von Verknüpfungen

Die zur Realisierung dieser Aufgaben notwendigen informationstechnischen Konzepte und Methoden speziell hinsichtlich der Verteilungsunterstützung, der autonomen Überwachung von Änderungen und der nachrichtenbasierten Kommunikation prädestinieren, wie nachfolgend gezeigt wird, den Einsatz der Agententechnologie und besonders die Verwendung eines Multiagentensystems.

Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine agentenbasierte Verknüpfungsverwaltung auf Basis eines Multiagentensystems, dessen Adäquatheit in Abschnitt 5.2 detailliert nachgewiesen wird, konzipiert und prototypisch umgesetzt.

## 5.2 Agenten und Multiagentensysteme

*Multiagent systems are the best way to characterize or design distributed computing systems.*

Huhns und Stephens [HS99]

In den 70er-Jahren entwickelte sich die Forschungsrichtung der Verteilten Künstlichen Intelligenz (VKI<sup>1</sup>). Sie wird seither sehr stark durch verschiedene For-

---

<sup>1</sup>engl. DAI - Distributed Artificial Intelligence

schungsgebiete aus der Künstlichen Intelligenz (KI), der Informatik, der Soziologie, der Wirtschaftswissenschaften, der Organisations- und Systemtheorie und der Psychologie beeinflußt.

Weiss [Wei99] charakterisiert die verteilte künstliche Intelligenz folgendermaßen:

*DAI is the study, construction, and application of multiagent systems, that is, systems in which several interacting, intelligent agents pursue some set of goals or perform some set of tasks.*

Das Ziel dieser multidisziplinären Forschungsrichtung ist es, mit Hilfe von Agenten und Multiagentensystemen Lösungen für Problemstellungen anzubieten, welche vordringlich in sehr großen, hoch komplexen, dynamischen und sehr stark verteilt organisierten Systemen entstehen. Derartige Systeme sind z.B.:

- E-Commerce und elektronische Marktplätze
- Telekommunikation und Netzwerke
- Informationsumgebungen (Internet)
- Kontrolle und Steuerung von Verkehrsflüssen
- Simulation verschiedener komplexer sozialer Phänomene.

Multiagentensysteme eignen sich besonders zur Unterstützung von Systemen, welche nach Weiss [Wei99] eine:

1. inhärente Verteilung und
2. inhärente Komplexität

aufweisen. Dies bedeutet, daß die zu verarbeitenden Daten räumlich, zeitlich, semantisch und funktional verteilt sind (1), und die Systeme so komplex sind, daß eine zentrale ganzheitliche Analyse, Abbildung und Verwaltung aus Zeit- und Kostengründen uneffizient oder unmöglich ist (2).

Ferber [Fer99] fügt dieser Aufzählung hinsichtlich der Charakterisierung geeigneter Systeme noch die Dynamik, im Sinne der Möglichkeit auf Änderungen in der internen Struktur oder der Umgebung reagieren zu können, hinzu.

Im Kontext dieser Arbeit läßt sich konstatieren, daß ein Informations- und Kommunikationssystem als integrative Arbeitsumgebung für die Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 4.4 und 5.1 vorgeschlagenen verknüpfungsbasierten Gesamtarchitektur, ein System darstellt, welches genau diese inhärente Verteilung und Komplexität und überdies ein hohes Maß an Dynamik besitzt. Demnach scheint es zweckmäßig, die Methoden und Verfahren der VKI und mithin der Agenten und Multiagentensysteme zur

MULTIAGENTEN-  
SYSTEM ZUR  
UNTER-  
STÜTZUNG DES  
VERKNÜP-  
FUNGSBASIERTEN  
ANSATZES

Lösung der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Aufgaben bei der Verknüpfungsverwaltung einzusetzen und entsprechend zu adaptieren, um dadurch die koordinierte Kooperation innerhalb des hier entwickelten verknüpfungsbasierten Ansatzes zu gewährleisten.

Aus diesem Grund wird nachfolgend eine kurze theoretische Einführung zu den Konzepten der Agenten und der Multiagentensysteme gegeben. Anschließend wird die Verknüpfungsverwaltung basierend auf dem Einsatz eines Multiagentensystems detailliert diskutiert.

### 5.2.1 Softwareagenten

Ein Agent kann prinzipiell dadurch beschrieben werden, daß er selbständig Aufgaben für einen Auftraggeber erfüllt, für deren Ausführung entweder eine Vielzahl von (zeitaufwendigen) Einzelschritten oder bestimmtes Fachwissen notwendig sind [BZW98].

Zur Erledigung dieser Aufgaben nimmt der Agent Einflüsse aus seiner Umgebung wahr, verarbeitet diese zielgerichtet und wirkt anschließend (verändernd) auf seine Umgebung ein (s. Abbildung 5.2).

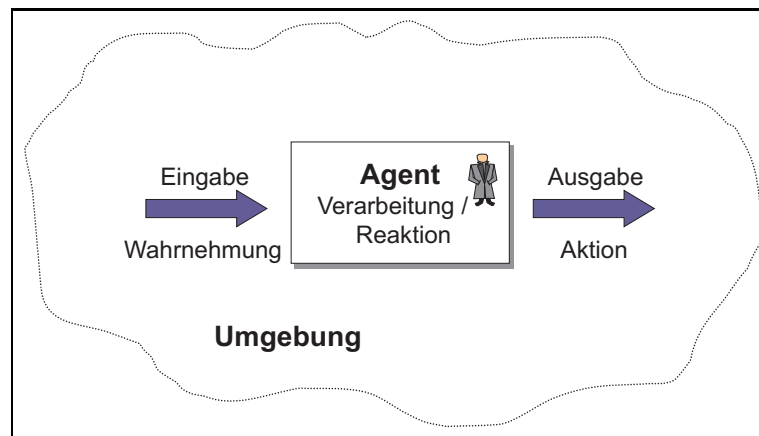


Abbildung 5.2: Prinzipielle Arbeitsweise der Agenten

Bezüglich dieser sehr allgemeinen Beschreibung können drei Agentenkategorien unterschieden werden: menschliche Agenten (z.B. Reisebüroangestellte), Hardwareagenten (Roboter) und Softwareagenten.

In dieser Arbeit wird nur die letztgenannte Kategorie der Softwareagenten, welche prinzipiell beliebige Softwarebausteine<sup>2</sup> sein können, betrachtet.

Softwareagenten nehmen Eingaben in Form von Informationen aus ihrer Umgebung wahr. Ihre interne Programmlogik verarbeitet diese Informationen und wirkt entsprechend auf die Umgebung ein. Die Interaktion eines Softwareagenten

---

<sup>2</sup>implementierter Programmcode z.B. innerhalb von Programmen, Threads oder Prozessen

mit seiner Umgebung erfolgt bezüglich der Ein- und Ausgaben über Methoden- bzw. Funktionsaufrufe oder über Nachrichten (s. Abbildung 5.3).

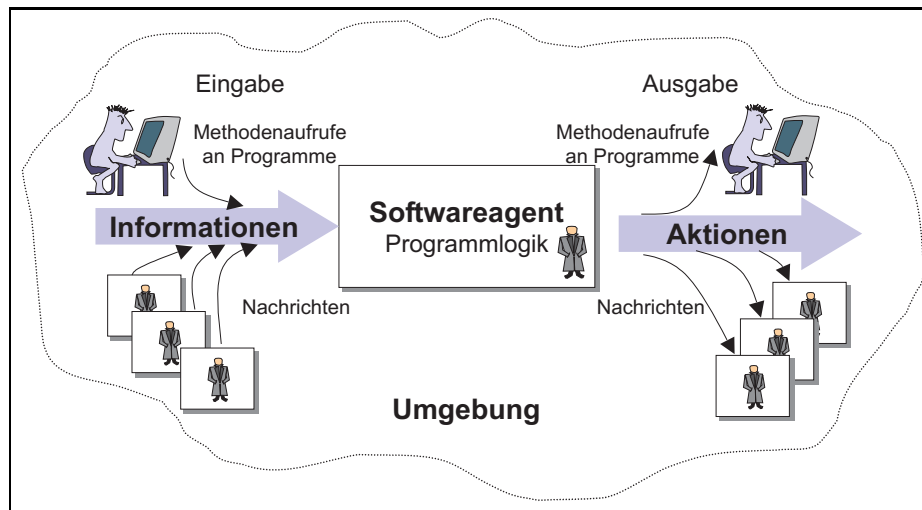


Abbildung 5.3: Arbeitsweise eines Softwareagenten

### Eigenschaften von Softwareagenten

Auf Grund der Einflüsse verschiedener Forschungsbereiche auf die Agententechnologie und deren vielfältige Anwendungsgebiete ist eine global gültige Definition für Softwareagenten bisher nicht aufgestellt wurden.

Zu Verständigungszwecken und insbesondere aus Gründen der Abgrenzung zwischen Agenten und herkömmlichen softwaretechnischen Programmkonstrukten (wie z.B. Dämons oder Objekten) werden Agenten daher meist über ihre Eigenschaften in einem speziellen Anwendungskontext definiert.

Brenner et al. [BZW98] unterscheiden folgende Eigenschaften von Softwareagenten:

**Reaktivität** Diese Eigenschaft eines Agenten bezeichnet seine Fähigkeit auf wahrgenommene Informationen aus seiner Umgebung reagieren zu können. Die Umgebung kann dabei aus anderen Agenten, menschlichen Benutzern oder sonstigen externen Informationsquellen bestehen.

**Proaktivität/Zielorientiertheit** Proaktivität meint, daß ein Agent nicht ausschließlich nur auf Ereignisse aus seiner Umgebung reagiert, sondern in bestimmten Situationen selbständig die Initiative übernimmt, um seine Ziele und Aufgaben zu erfüllen.

**Schlußfolgerungs-/Lernfähigkeit** Diese Eigenschaften beziehen sich auf die Intelligenz des Agenten. Demnach kann ein Agent (bzw. sein Verhalten) als

intelligent bezeichnet werden, wenn er aus den gegebenen Informationen (und seiner internen Wissensbasis) rationale Schlußfolgerungen zieht oder sich im Sinne eines Lernprozesses an neue Gegebenheiten anpaßt.

**Autonomes Handeln** Die Eigenschaft, seine Ziele und Aufgaben autonom, das heißt ohne äußere Eingriffe oder Anweisungen zu verfolgen, ist einer der wesentlichen Unterschiede zwischen Agenten und herkömmlichen Softwareapplikationen. Hierzu muß ein Agent die Kontrolle über seine Aktionen und inneren Zustände und überdies die notwendigen Ressourcen zur Erledigung seiner Aufgaben besitzen.

**Mobilität** Unter Mobilität wird die Fähigkeit eines Agenten verstanden sich in einem elektronischen Netzwerk zu bewegen bzw. von einem Rechner zu einem anderen Rechner zu migrieren. Die Mobilität bringt entscheidende Vorteile bei der Reduktion der Netzwerkbelastung, da ein mobiler Agent zu einem entfernten Rechner migriert, dort direkt die benötigten Informationen bezieht und mit den Informationen zurückkehrt, um anschließend seine Aufgaben wieder ohne Netzbelastung zu erledigen. Bei ausgeprägter Autonomie- bzw. Proaktivität und entsprechendem Intelligenzvermögen kann und muß ein mobiler Agent selbständig entscheiden wann er zu welchem Rechner migriert.

**Kommunikation/Kooperation** Ein Agent muß zur Erledigung seiner Aufgaben in der Regel mit seiner Umgebung interagieren. Zu diesem Zweck kann er mit anderen Agenten oder menschlichen Benutzern kommunizieren. Zwischen Agenten geschieht dies auf Basis von Agentenkommunikationssprachen (ACL<sup>3</sup>). Werden mehrere Agenten eingesetzt, um gemeinsam Aufgaben zu erfüllen oder um konträre konkurrierende Zielstellungen zu verfolgen, ist eine reine Kommunikation zwischen den Agenten unzureichend. In diesem Fall müssen die Agenten kooperative Eigenschaften aufweisen, um auf Basis erweiterter Agentenkommunikationssprachen Aufgaben zu delegieren, über deren Ausführungsrecht zu verhandeln oder um Wissensstände und Zielvorstellungen abzugleichen.

**Charakter** Besonders in Situationen, in denen ein Agent eng mit menschlichen Benutzern interagiert und kommuniziert, sind bestimmte menschliche Charaktereigenschaften auf den Agenten zu übertragen. So sind vor allem dessen Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit wesentliche Voraussetzungen dafür, daß der Benutzer den Agenten akzeptiert und ihm die Ausführung von Aufgaben überläßt. Verschiedentlich spielen auch emotionale Zustandsäußerungen eine wichtige Rolle bei der Mensch-Agenten-Interaktion.

---

<sup>3</sup>Agent Communication Language

Bezüglich dieser Eigenschaften unterscheiden Wooldridge und Jennings [WJ95] eine schwache und eine starke Agentenausprägung. Sie ordnen Softwarebausteinen einen schwachen Agentencharakter zu, wenn die Eigenschaften Autonomie, soziales Verhalten (Kommunikation in obiger Aufzählung), Reaktivität und Proaktivität vorliegen. Ein aus ihrer Sicht stark ausgeprägter Agentencharakter erfordert zusätzlich die oben unter der Eigenschaft Charakter subsumierten Merkmale wie Wissen, Glauben, Intention oder Emotionen.

Besonders in den Forschungsbereichen der KI (Künstliche Intelligenz) und der VKI wird vornehmlich von intelligenten Agenten gesprochen. Da allerdings die Intelligenz als solche nur sehr schwer zu definieren ist, wird auch an dieser Stelle einem Agenten Intelligenz zugesprochen bzw. ein intelligentes Verhalten erwartet, wenn er bestimmte Merkmale bzw. Eigenschaften besitzt.

Sinngemäß gibt Wooldridge [Woo99] folgende Definition eines intelligenten Agenten:

*... Ein intelligenter Agent agiert flexibel und autonom, um seine Ziele zu erreichen, wobei Flexibilität meint, daß er reaktiv und proaktiv agiert und sich dabei sozial verhält.*

Schlußfolgernd ist ein Agent ein Softwarebaustein, der mindestens die Eigenschaften Reaktivität und Proaktivität besitzt und zur Erledigung seiner Aufgaben mit seiner Umgebung (Nutzer, andere Agenten, andere Softwarebausteine) kommuniziert. Zusätzlich können je nach Anwendungsgebiet und Einsatzzweck des Agenten weitere (der oben aufgeführten) Eigenschaften essentiell, weniger stark ausgeprägt oder gar unerwünscht sein.

Die im Kontext des verknüpfungsbasierten Ansatzes Verwendung findenden Agenten und ihre spezifischen Eigenschaften werden in Abschnitt 5.3 ausführlich dargestellt.

### 5.2.2 Multiagentensysteme (MAS)

Im letzten Abschnitt (5.2.1) wurden die Eigenschaften von Agenten diskutiert. Je nach Ausprägung dieser Eigenschaften können Agenten zur Lösung unterschiedlichster Aufgaben eingesetzt werden. Ein wesentliches Einsatzgebiet von Agenten ist deren Verwendung als intelligente Assistenten (Expertensysteme oder Assistenten wie z.B. Microsoft Office-Assistent). Diese Agenten arbeiten im Prinzip eigenständig im Dialog mit dem Benutzer, ohne weitere Kommunikation mit anderen Softwarebausteinen.

Bedingt durch die zunehmende informationstechnische Vernetzung treten derartige Situationen und Problemstellungen, welche durch individuelle, unabhängige Agenten Unterstützung finden, eher in den Hintergrund.

Auf die Anwendung von Agenten bezogen bedeutet dies, daß aufgrund der Komplexität, der Größe und der Verteiltheit der zu unterstützenden Informations-



systeme mehrere Agenten im Rahmen eines Multiagentensystems zur Lösung spezifischer Aufgabenstellungen eingesetzt werden.

Huhns et al. [HS99] charakterisieren ein System, welches adäquat durch ein MAS unterstützt werden kann, wie folgt:

*The information involved is necessarily distributed, and it resides in information systems that are large and complex in several senses: (1) they can be geographically distributed, (2) they can have many components, (3) they can have a huge content, both in the number of concepts and in the amount of data about each concept, and (4) they can have a broad scope, i.e., coverage of a major portion of a significant domain. Also, the components of the systems are typically distributed and heterogeneous. The topology of these systems is dynamic and their content is changing so rapidly that it is difficult for a user or an application program to obtain correct information, or for the enterprise to maintain consistent information.*

Im Rahmen derartig charakterisierter Systeme, zu denen sich auch die verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierung und -verwaltung zählen läßt, können Agenten in Form von:

- intelligenten Applikationsprogrammen
- aktiven Informationsressourcen
- „Wrapper“ um herkömmliche Komponenten

auftreten. Ihre Kooperation dient dazu, um insgesamt einen globalen Informationszugriff und ein besseres Management der Informationen zu gewährleisten und dadurch die strategisch im Sinne des Gesamtsystems zu erledigenden Aufgabenstellungen effizient zu lösen. Gegenüber herkömmlichen zentralen Ansätzen ergeben sich die Effizienzsteigerungen beim Einsatz von MAS speziell aus den Möglichkeiten der:

- kooperativen und parallelen Arbeit der Agenten an der gemeinsamen Problemstellung
- gemeinsamen Nutzung spezifischen Fachwissens
- modularen und unabhängigen Entwicklung und Definition der Agenten und deren Wiederverwendung
- Toleranz des Gesamtsystems gegenüber lokalen Systemfehlern und -ausfällen [HS99].

Ein MAS ist nur dann in der Lage die fokussierten Problemstellungen zu lösen, wenn die spezifischen autonomen Agenten innerhalb des MAS zielgerichtet kooperieren.

### 5.2.3 Agenteninteraktion

Die Kommunikation als Basis der Kooperation zwischen Agenten ist eine unabdingbare Voraussetzung zur sinnvollen Etablierung eines Multiagentensystems. Diese Kommunikation muß entsprechend der Zielstellung des Systems koordiniert werden. Huhns et al. [HS99] unterscheiden hierbei zwei Arten der Koordination (s. Abbildung 5.4):

**Kooperation** bezeichnet die Koordination der Aktivitäten nicht antagonistischer Agenten, also deren Zusammenarbeit mit der Absicht des Erreichens eines gemeinsamen Ziels.

**Verhandeln** umfaßt die Koordination der Kommunikation zwischen im Wettbewerb stehenden Agenten.

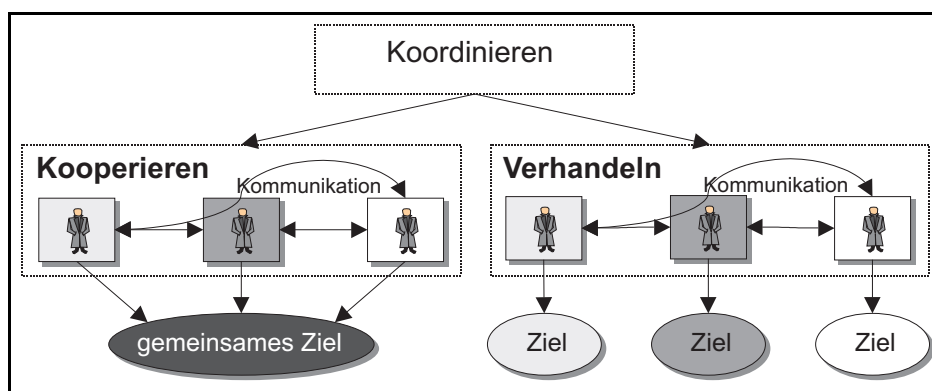


Abbildung 5.4: Koordination der Kommunikation

Der in dieser Arbeit entwickelte und hier durch ein MAS zu unterstützende verknüpfungsbasierte Modellierungsansatz als Basis einer integrativen Arbeitsumgebung für den Bauwerkslebenszyklus reflektiert einen Problembereich, der eindeutig durch eine gemeinsame Zielstellung (Planung bzw. Revitalisierung und Errichtung von Bauwerken) charakterisiert ist. Demzufolge muß die Kommunikation der involvierten Agenten entsprechend der oben aufgeführten Unterscheidung kooperativ koordiniert werden.

Die entsprechenden Mechanismen hinsichtlich der Kooperation der Agenten innerhalb des zur Verknüpfungsverwaltung herangezogenen MAS werden im Abschnitt 5.3 detailliert dargestellt.

Wie bereits erwähnt, stellt die Kommunikation die prinzipielle Basis der Kooperation der Agenten dar (vgl. Abschnitt 5.2.1). Prinzipiell stehen folgende Kommunikationsverfahren zur Realisierung des Informationsaustausches zwischen Agenten zur Verfügung (s. auch Abbildung 5.5):

- Versenden und Empfangen adressierter Nachrichten

- Setzen von Signalen in der Umgebung (Broadcasts)
- Hinterlassen unadressierter Nachrichten in öffentlichen Kommunikationsräumen (Notizbretter, Blackboards) oder
- Methoden- bzw. Prozeduraufrufe.

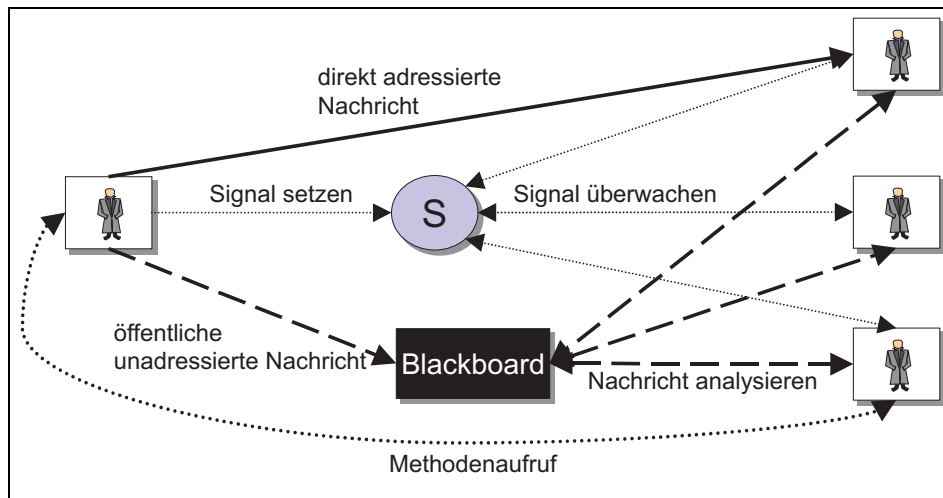


Abbildung 5.5: Kommunikationsverfahren zwischen Agenten

Die vielfältigsten Kommunikationsmöglichkeiten ergeben sich durch die Verwendung von Nachrichten, da deren inhaltliche Gestaltung nur wenigen Restriktionen unterliegt. Ihr besonderer Vorteil gegenüber einfachen Befehls- und Antwortstrukturen (Methodenaufrufen) besteht darin, daß sich die geforderte asynchrone Kommunikation (s. Abschnitt 5.1) sehr gut realisieren läßt.

Die Kommunikation mit Hilfe von Nachrichten bildet eine flexible Grundlage zur Implementierung komplexer Koordinationsstrategien [BZW98], wodurch sich speziell auch für den verknüpfungsbasierten Ansatz komplexe Kooperationsmöglichkeiten ergeben (s. Abschnitt 5.3).

### Nachrichtenbasierte Kommunikation

Das Prinzip der direkten Nachrichtenübermittlung zwischen Agenten basiert auf dem Versenden und Empfangen adressierter Nachrichten. Dabei sendet ein Agent (Sender) eine Nachricht an einen oder mehrere Agenten (Empfänger). Diese interpretieren die Nachricht und reagieren entsprechend.

Zur Realisierung dieser Nachrichtenübermittlung müssen (ähnlich der prinzipiellen Kommunikation in Netzwerken) verschiedene Kommunikationsprotokolle und Verhaltensregeln eingehalten werden, damit eine syntaktische und semantische Verständigung gewährleistet wird. Diesbezüglich muß zunächst das verwendete

Kommunikationsmedium auf Netzwerkebene und darauf aufbauend das Format bzw. die verwendete Syntax der Nachrichten zur allgemeinen Les- und Interpretierbarkeit der Nachrichten unter den Partizipierenden abgestimmt werden. Zu diesem Zweck sind verschiedene Agentenkommunikationssprachen entwickelt wurden, deren Ziel in der Standardisierung der nachrichtenbasierten Kommunikation besteht.

Die beiden wesentlichsten Vertreter dieser Standardisierungsbemühungen sind der KQML<sup>4</sup> [KQM93] und der FIPA<sup>5</sup>-ACL [FIP01] Standard. Beide Standards legen der nachrichtenbasierten Kommunikation ähnlichgeartete Schichtenmodelle zugrunde, welche auf verschiedenen Ebenen die notwendigen Vereinheitlichungen bzw. Festlegungen treffen (s. Abbildung 5.6).

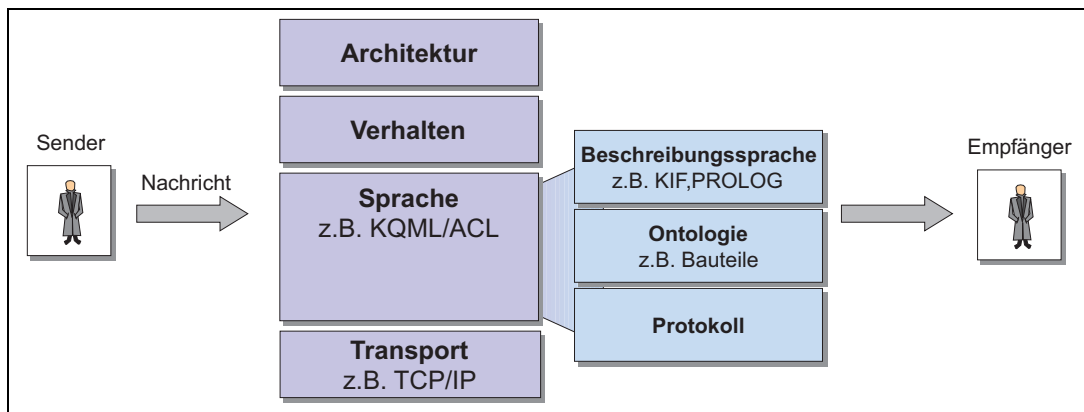


Abbildung 5.6: Schichten der Agentenkommunikation

Im einzelnen zwar leicht differierend, werden beginnend bei den Netzwerkprotokollen bis hin zu Agentensystemarchitekturen prinzipiell folgende Schichten unterschieden [Dom01a] (vgl. Abbildung 5.6):

**Transport** Diese Schicht regelt die Verwendung entsprechender Netzwerkprotokolle und sorgt somit für die korrekte Übertragung der Nachrichten.

**Sprache** Die Sprachschicht ist für die Festlegung der verwendeten Syntax und Semantik der Nachrichten verantwortlich. Diese Schicht wird noch einmal in die Ebenen Protokoll, Ontologie und Beschreibungssprache untergliedert.

**Protokoll** Protokolle auf Sprachniveau legen die verwendbaren Nachrichtentypen fest. Hierunter sind aus der Sprechakt-Theorie stammende Kommunikationsaktionen wie Nachfragen, Informieren, Auffordern, Vorschlagen, Ablehnen etc. zu verstehen. Diese Nachrichtentypen sind durch die Agentenkommunikationssprache prinzipiell festgelegt.

<sup>4</sup>Knowledge Query and Manipulation Language

<sup>5</sup>The Foundation for Intelligent Physical Agents

**Ontologie** Diese Ebene legt das zu verwendende Vokabular innerhalb der Nachrichten fest. Ohne geeignete Ontologien (kontextspezifische Begriffsfestlegungen - Terminologien in Taxonomien) kann keine vernünftige Kommunikation erfolgen.

**Beschreibungssprache** Die Beschreibungssprache bestimmt die Syntax des versendeten Nachrichtentextes also des eigentlichen Inhaltes der Nachricht.

**Verhalten** Innerhalb dieser Schicht wird das Verhalten der Agenten vereinbart. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Definition von Handlungsabfolgen, welche durch die Agenten eingehalten werden müssen. So ist es zur Kooperation der Agenten zum Beispiel notwendig, wenn Anfragen oder Aufforderungen an Agenten gerichtet werden, daß diese beantwortet, ausgeführt oder Gründe zur Verweigerung genannt werden.

**Architektur** Die Architekturschicht definiert diverse Rollen für spezielle Agenten, welche vornehmlich organisatorische Dienste im Sinne der Verwaltung und Registrierung der involvierten Agenten übernehmen.

Auf Basis dieser, die Kommunikation standardisierender Sprachen, ist ein Informationsaustausch zwischen den verschiedenen, ganz unterschiedliche Aufgaben wahrnehmenden Agenten möglich. Insbesondere auch das Erweitern des Gesamtsystems, um bisher nicht mitwirkende Agenten, ist durch die Standardisierung der Kommunikationssprache unproblematisch.

Beide Aspekte sind speziell auch im Rahmen der verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellverwaltung von besonderer Bedeutung, da hier gerade der Informationsaustausch zwischen prinzipiell a priori unbekannten Domänen und sie vertretenden Agenten realisiert werden muß.

### Mobile Agenten

Einen alternativen Weg der Kooperation, besonders innerhalb stark netzwerkorientierter Systeme, stellt die Verwendung mobiler Agenten dar.

Mobile Agenten besitzen die Fähigkeit, innerhalb eines Netzwerkes zu verschiedenen Rechnern zu migrieren.

Unter Migration wird der netzwerkbasierte Wechsel eines Agenten, d.h. seines Programmcodes, seiner Zustandsinformationen und seines Ausführungskontextes von einem Rechner zu einem anderen verstanden, wobei der Agent den Zeitpunkt und den Zielrechner möglichst selbständig bestimmt (s. Abbildung 5.7) [Hei01]. Der Vorteil der Migration liegt darin, daß eine Netznutzung (zeit- und kostenintensiv) nur während der Migration des Agenten von einem zum anderen Rechner vorliegt. Die tatsächliche Erledigung seiner Aufgaben erfolgt dann lokal auf dem Zielrechner, wobei die im Sinne der Netznutzung aufwendige nachrichtenbasierte Kommunikation vermieden wird.

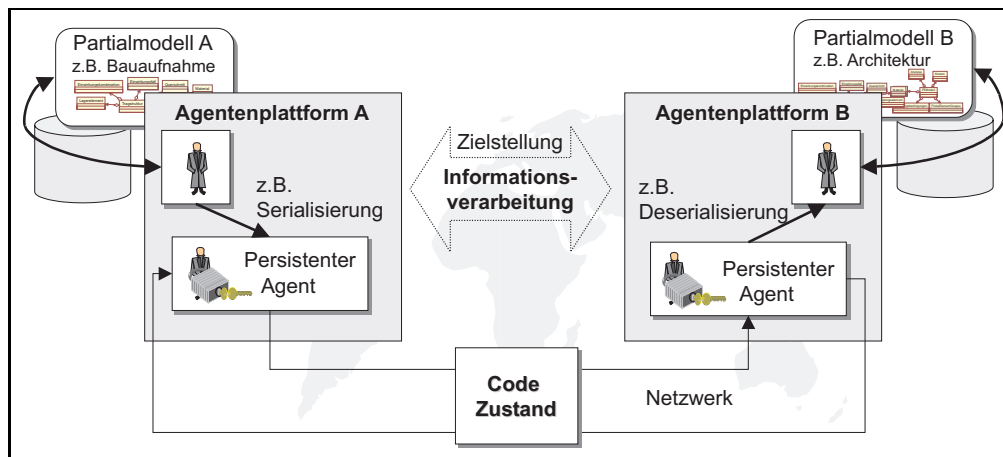


Abbildung 5.7: Migrationsvorgang

Migration der Agenten bedeutet demnach, daß die datenverarbeitende Funktionalität der Agenten zu den Daten bewegt wird und nicht wie üblicherweise die Daten zur Verarbeitungseinheit.

Der Vorgang der Migration stellt hohe Anforderungen an die Agenten und die zugrundeliegende Agentenplattform hinsichtlich der

- Übertragung der Agenten (Programmcode, Zustand, Ausführungskontext)
- Sicherheit der Agenten, der Plattformen und der Daten
- Persistenz der Agenten (Migrationsvoraussetzung).

Dadurch begründet sich die Tatsache, daß die Migration nur dann nutzbringend eingesetzt werden kann, wenn die Komplexität und der Umfang der entfernt vorliegenden Daten deutlich höher ist, als die auf die Daten anzuwendende Funktionalität. Dies gilt besonders für Such- oder Analysemechanismen auf sehr umfangreichen entfernten Datenbeständen.

Innerhalb des verknüpfungsbasierten Ansatzes liegen derartige Problemstellungen ebenfalls vor. So bildet gerade die asynchron orientierte Suche nach entsprechenden Informationen in den verschiedenen entfernten Partialmodellen und Partialmodelldaten ein prädestiniertes Aufgabenfeld für mobile Agenten.

Weitergehende detailliertere Informationen bezüglich der Agenten allgemein können zum Beispiel [JW98] [BZW98] [CH98] [Klu99] entnommen werden. Informationen zu Multiagentensystemen finden sich beispielsweise in [Wei99] [Fer99] und aus technischer Sicht besonders in [Hei01].

Die nachfolgenden Abschnitte dieses Kapitels gehen nun detailliert auf die agentenbasierte Bauwerksmodellverwaltung ein. Dabei werden zunächst die Gesamtarchitektur des konzipierten MAS, die aufgabenspezifischen Agenten und deren

zur Erledigung der entsprechenden Aufgaben notwendige Eigenschaften (s. Abschnitt 5.2.1) reflektiert.

### 5.2.4 Stand der Forschung

Softwareagenten und Multiagentensysteme sind Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben im Bauwesen. Dabei sollen insbesondere zwei Aspekte im Bauwerkslebenszyklus bzw. der Bauplanung Unterstützung finden.

Dabei werden kooperationsbezogene Problemstellungen betrachtet, welche sich aus der räumlich und zeitlich verteilt organisierten Bearbeitung von Bauplanungsprojekten ergeben. Dazu werden Softwareagenten im Rahmen von Multiagentensystemen in erster Linie zur Gewährleistung eines Informationsflusses zwischen den Beteiligten und ihren Fachapplikationen eingesetzt [Khe95a] [MB95] [RM00] [The01].

Ein anderer wesentlicher Ansatzpunkt zur Betrachtung agentenbasierter Technologien ergibt sich durch die Kooperation verschiedener Beteiligter. Hierbei werden hauptsächlich Problemlösungen hinsichtlich der kooperativen Erstellung konfliktfreier und konsistenter Planungen angestrebt. Besonders die nachrichtenbasierte Kommunikation verschiedener autonomer Agenten und die Verarbeitung spezifizierter Regeln und Bedingungen bilden dabei den Fokus der Untersuchungen [Khe95b] [Khe96] [UANT00].

Die untersuchten Forschungsprojekte belegen die Relevanz der Agententechnologie als adäquaten Lösungsansatz zur Unterstützung der kooperativen Aspekte im Rahmen der verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierung.

## 5.3 Agentenbasiertes Verknüpfungsmanagement

Den Hauptbestandteil der Verwaltung des entwickelten verknüpfungsbasierten Bauwerksmodells bildet die Organisation der Verknüpfungstypen und Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen [WHBD01].

Das Ziel des Einsatzes der Agententechnologie besteht demnach in erster Linie in der Bereitstellung eines Verknüpfungsmanagementsystems zur effizienten Erstellung, Verwaltung und Abarbeitung der Verknüpfungen.

Diesbezüglich wird im folgenden zunächst die Gesamtarchitektur des Bauwerksmodellverbundes basierend auf einem Multiagentensystem dargestellt. Anschließend werden die verschiedenen verknüpfungsbezogenen Aufgaben und deren Unterstützung durch die spezifischen Agenten des MAS detailliert.

### 5.3.1 Agentenbasierte Systemarchitektur

Um die prozeßbedingten domänenübergreifenden Informationsanforderungen zwischen den auf verschiedenen Partialmodellen arbeitenden Fachplanern und -appli-

kationen befriedigen zu können, ist zunächst die Verwaltung des dynamisch variierbaren Bauwerksmodellverbundes zu realisieren.

Die Verwaltung des Bauwerksmodellverbundes umfaßt im wesentlichen das Anmelden, Registrieren und Abmelden der entsprechenden Domänen und mithin der Partialmodelle und Modellverwaltungssysteme (s. Abschnitt 3.4.2). Zu diesem Zweck wird ein MAS konzipiert, welches aus einem zentralen Agentenmanagementsystem (AMS) und den Domänen zugeordneten Domänenagenten besteht. Die agentenbasierte Gesamtarchitektur des Bauwerksmodellverbundes wird in Abbildung 5.8 illustriert.

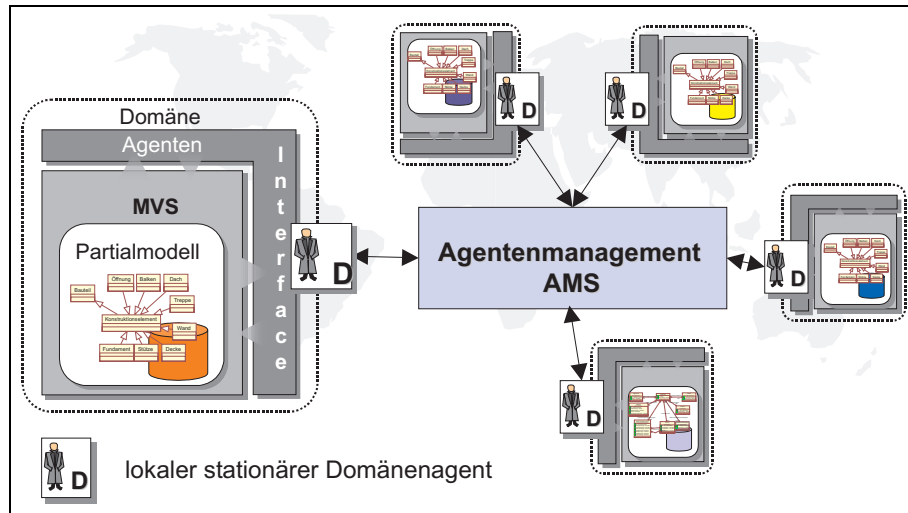


Abbildung 5.8: Agentenbasierter Bauwerksmodellverbund

Demnach kommunizieren die lokalen Domänenagenten mit dem zentralen Agentenmanagementsystem, welches Bestandteil der zentralen Komponente ist, um:

- ihre Domänen in den Bauwerksmodellverbund zu integrieren und um somit Informationsanforderungen zur Verfügung zu stehen
- den Bauwerksmodellverbund zu verlassen
- Informationen über andere involvierte Domänen zu erlangen
- auf andere Partialmodelle und -daten zuzugreifen.

Entsprechend der Dynamik des Bauwerksmodellverbundes werden die aktuell involvierten Domänen (stellvertretend ihre Domänenagenten) über das Hinzufügen neuer bzw. das Entfernen vorhandener Domänen benachrichtigt. Dabei obliegt es den Domänenagenten korrekt auf diese Nachrichten zu reagieren. Je nach Inhalt der Nachricht (Entfernen oder Hinzufügen von Domänen) müssen die Domänenagenten zum Beispiel mit den Verknüpfungsagenten (s. Abschnitt 5.3.2) kommunizieren, so daß diese gegebenenfalls existierende Verknüpfungen löschen

DOMÄNEN-  
AGENTEN UND  
AMS ZUR  
VERWALTUNG  
DES BAU-  
WERKSMODELL-  
VERBUNDES



bzw. deaktivieren oder neue Verknüpfungen und korrelierende Modellelemente zur Verfügung stellen. Ebenso müssen die beteiligten Fachplaner über die eingetretenen Ereignisse informiert werden.

Somit sind alle Beteiligten jederzeit über die aktuelle Konstellation des Bauwerksmodellverbundes unterrichtet und können durch entsprechende Verknüpfungen mit den Domänen innerhalb des Verbundes zum Zwecke des Daten- und Informationsaustausches in Kontakt treten.

An dieser Stelle ist der Einsatz eines Multiagentensystems besonders zweckmäßig, da gerade hier die in Abschnitt 5.2 benannte inhärente Verteilung des Systems Unterstützung findet. Innerhalb des MAS können basierend auf einer standardisierten Kommunikation beliebig implementierte und verteilte Domänen in den Bauwerksmodellverbund integriert und dem verknüpfungsbasierten Daten- und Informationsaustausch zugänglich gemacht werden.

### 5.3.2 Verknüpfungserstellung

Das oben beschriebene Multiagentensystem gewährleistet den Zugriff auf die Partialmodelle und die Partialmodelldaten der jeweiligen Domäne.

Dies bildet die grundlegende Voraussetzung zur Definition von Verknüpfungstypen und zur Spezifikation von Verknüpfungen. Dies wiederum stellt die notwendige Basis zur deskriptiven Abbildung des Beziehungsgefüges zwischen den Partialmodellen dar.

Die zu erstellenden Verknüpfungstypen beschreiben dabei die Beziehungen zwischen Entwurfsobjekten auf Bauwerksmodellebene. Ihre Definition erfolgt durch Ausprägung eines durch das Framework auf Modellierungskonzeptebene bereitgestellten Basisverknüpfungstyps. Dem Verknüpfungstyp werden Quell- und Zielelemente (Klassen und Attribute) verschiedener Partialmodelle und eine entsprechende Verknüpfungslogik zugeordnet.

Im Rahmen der Verknüpfungsspezifikation werden die so erstellten Verknüpfungstypen mit konkreten Ausprägungen der Entwurfsobjekte (Instanzen und Attributwerte) auf Modelldatenebene instanziiert.

Demnach werden im Zuge der Verknüpfungstypdefinition und deren Ausprägung zu Verknüpfungen Informationen zu den potentiell verknüpfbaren Modellelementen der involvierten Partialmodelle benötigt.

Diese Aufgabe übernehmen die Verknüpfungsagenten, welche in Kooperation mit den Domänenagenten sowohl die domäneneigenen Zielelemente als auch die domänenübergreifenden (Quell-)Modellelemente bereitstellen (s. Abbildung 5.9).

Die Verknüpfungsagenten motivieren ganz wesentlich den Einsatz der Agententechnologie zur Verknüpfungsverwaltung. Dieser Typ von Agent trägt, eine entsprechende Modellierung als intelligenter Assistent vorausgesetzt, enorm zur Er-

VERKNÜPFUNGS-  
AGENTEN ZUR  
BEREITSTEL-  
LUNG DER  
POTENTIELL  
VERKNÜPFBA-  
REN  
ELEMENTE

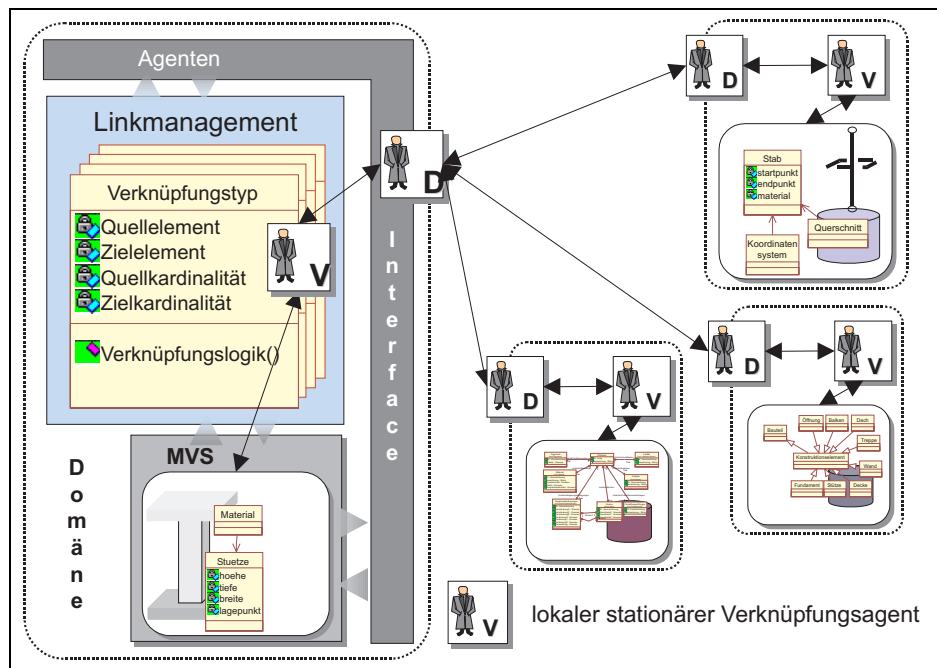


Abbildung 5.9: Verknüpfungserstellung mit Hilfe von Verknüpfungsagenten

leichterung der Definition der Verknüpfungstypen und der anschließenden Verknüpfungsspezifikation bei.

Hierzu benötigt der Verknüpfungsagent fachspezifisches domänenübergreifendes Wissen, um beispielsweise

- eine Vorauswahl von zu verknüpfenden Elementen im Rahmen der Verknüpfungstypdefinition zu treffen
- entsprechend selektierter Verknüpfungstypen nur relevante Ausprägungen der in Beziehung stehenden Modellelemente anzubieten
- fehlerhafte oder nicht sinnvolle Verknüpfungstypen und Verknüpfungen zu vermeiden.

### 5.3.3 Verknüpfungsabarbeitung

In Abschnitt 4.5.3 wurden die verschiedenen Kategorien von Verknüpfungen hinsichtlich ihrer Funktion und ihres prinzipiellen Einsatzzweckes beleuchtet. In diesem Abschnitt soll nun detailliert auf die spezifische Verknüpfungsabarbeitung innerhalb der jeweiligen Kategorien eingegangen werden.

Auf Grund der verschiedenen Zielstellungen unterscheiden sich die informierenden, generierenden und propagierenden Verknüpfungen bezüglich ihrer Abarbeitung voneinander.

## Generierende Verknüpfungen

Die im Sinne der Datenintegration wesentlichste Kategorie stellen die generierenden Verknüpfungen dar.

Das Ziel dieser Verknüpfungen besteht darin, Zieldaten (Instanzen und Attributwerte) entsprechend gegebener Ausgangsdaten zu erzeugen. Zu diesem Zweck werden die Quell- bzw. Ausgangsdaten identifiziert und dem entsprechend instanziierten Verknüpfungstyp zugeordnet. Durch die bei der Erstellung des Verknüpfungstyps zu definierende Verknüpfungslogik wurde festgelegt, welche Daten im Zielmodell in welcher Reihenfolge erzeugt werden. Diesen Gesamtvorgang illustriert die Abbildung 5.10.

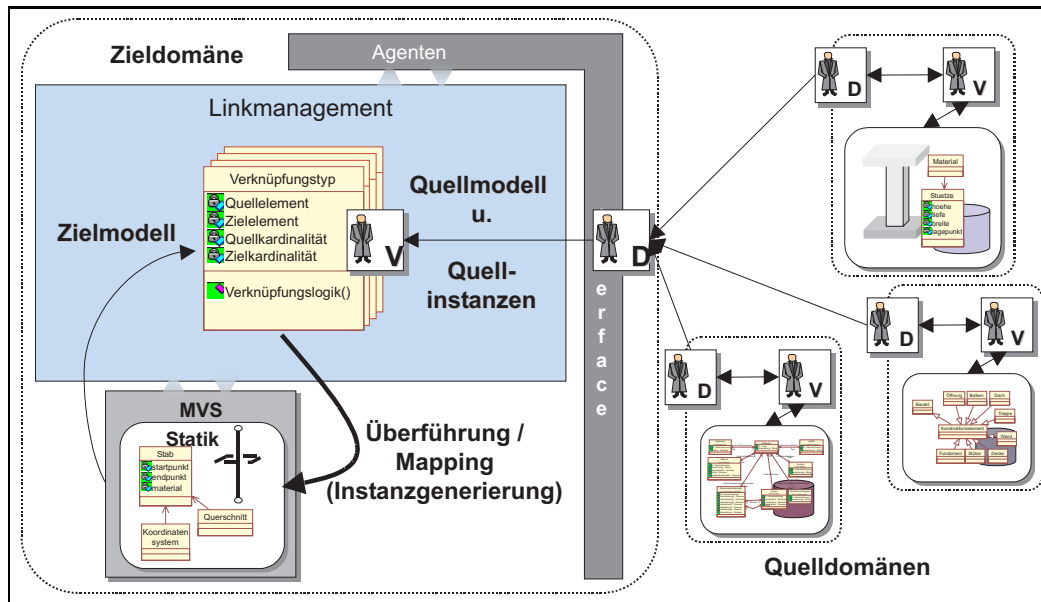


Abbildung 5.10: Abarbeitung generierender Verknüpfungen

## Informierende Verknüpfungen

Eine effiziente Kommunikation der domänenspezifischen Beteiligten im Sinne eines auf Datenänderungen beruhenden Informationsaustausches wird in erster Linie durch die informierenden Verknüpfungen unterstützt.

Aufgabe der informierenden Verknüpfungen ist es dabei, spezifizierte Quellelemente auf das Eintreten bestimmter Ereignisse hin zu überwachen und damit in Beziehung stehende Zielelemente über diese Ereignisse zu benachrichtigen<sup>6</sup>. Um eine Informationsflut zu vermeiden, sind die informierenden Verknüpfungen

<sup>6</sup>Eine Variante der Identifikation in Beziehung stehender Elemente stellt die Verwaltung von Objektversions- bzw. Bindungsrelationen nach Firmenich [Fir01] dar.

in diesem Zusammenhang dafür verantwortlich, nur wirklich relevante Änderungen mitzuteilen. Dies wird über Randbedingungen realisiert, welche gegen die auftretenden Ereignisse evaluiert werden. Sind die ereignis- und verknüpfungsspezifischen Randbedingungen nicht erfüllt, wird keine Benachrichtigung an die Zieldomäne ausgelöst. Die Abbildung 5.11 illustriert die prinzipielle Wirkungsweise der informierenden Verknüpfungen.

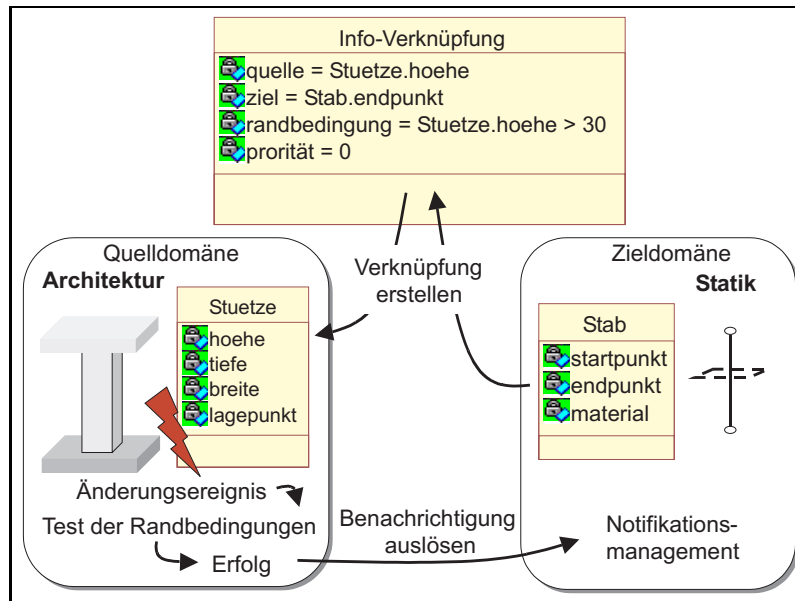


Abbildung 5.11: Spezifik informierender Verknüpfungen

Die möglichen zu überwachenden Ereignisse wurden bereits in Abschnitt 4.5.3 aufgeführt. Durch die Einbeziehung der Modelldynamik müssen demnach sowohl Datenänderungen (Erzeugen und Löschen von Instanzen bzw. Setzen und Löschen von Attributwerten) als auch Modellmodifikationen (Löschen und Erzeugen von Klassen und Attributen, Modellumstrukturierungen, Änderungen von Attribut- und Klassennamen) berücksichtigt werden.

Dies geschieht zunächst ebenfalls durch die Zuordnung von Quell- und Zielelementen im Rahmen der Verknüpfungsspezifikation. Die Verknüpfungslogik besteht in diesem Fall jedoch darin:

- ein zu überwachendes Ereignis festzulegen
- spezielle Randbedingungen hinsichtlich der Auswertung dieses Ereignisses zu formulieren und
- eine entsprechende Benachrichtigung an die Zieldomäne zu initiieren.

Die Abarbeitung dieser Kategorie angehörender Verknüpfungen entspricht prinzipiell der der propagierenden Verknüpfungen. Deshalb werden zunächst die Details

der propagierenden Verknüpfungen erläutert, ehe in Abbildung 5.12 eine graphische Illustration der Vorgänge bei der Abarbeitung dieser beiden Verknüpfungsarten erfolgt.

### Propagierende Verknüpfungen

Die propagierenden Verknüpfungen nehmen eine Zwitterstellung zwischen generierenden und informierenden Verknüpfungen ein.

Im Sinne der generierenden Verknüpfungen besitzen sie datenmanipulierende Verknüpfungslogik, um Zielelemente zu modifizieren oder zu generieren. Ihre Abarbeitung ist jedoch korrespondierend zu den informierenden Verknüpfungen von eintretenden relevanten Datenänderungen in Quelldomänen abhängig.

Der Unterschied zu den informierenden Verknüpfungen besteht darin, daß nicht nur eine bloße Benachrichtigung der Zieldomäne (Zielelemente) erfolgt, sondern daß entsprechend der Verknüpfungslogik der propagierenden Verknüpfung Zielelemente modifiziert, d.h. Änderungen aus den Quelldomänen in die Zieldomäne propagiert werden.

Im Unterschied zu den generierenden Verknüpfungen werden diese Propagationen jedoch dem Fachplaner zunächst als Benachrichtigung mitgeteilt und erst nach dessen Bestätigung ausgeführt.

Die Erstellung der informierenden und propagierenden Verknüpfungen wird ebenfalls durch die bereits beschriebene Funktionalität der Verknüpfungsagenten unterstützt. Dabei setzen sich diese Verknüpfungen aus einem aktiven und einem passiven Teil zusammen [Böh01].

Der passive Teil verbleibt in der Zieldomäne und wartet auf die Benachrichtigung über eingetretene Ereignisse. Der aktive Teil der Verknüpfung wird als mobiler Agent ausgeprägt, welcher zur Quelldomäne migriert. Dabei nimmt er sowohl die Informationen, welche Ereignisse zu überwachen sind und gegen welche Randbedingungen sie zu testen sind, mit sich.

Auf diese Weise wird einerseits der geforderten asynchronen Kommunikation und Kooperation Rechnung getragen, da der mobile Agent in der Quelldomäne verbleibt, um auf das Eintreten bestimmter Ereignisse zu warten und entsprechend zu reagieren.

Andererseits wird durch den Einsatz der mobilen Agenten die Netzlast (WAN-LAN<sup>7</sup>) enorm gesenkt, da die Entscheidung über die Relevanz der Ereignisse innerhalb der Quelldomänen getroffen wird und somit nicht jede Datenänderung über das Netzwerk gesendet werden muß. Die Abbildung 5.12 stellt die prinzipiellen Abarbeitungsvorgänge sowohl der informierenden als auch der propagierenden Verknüpfungen dar. Der Unterschied zwischen informierender und propagierender Verknüpfung liegt letztlich nur in der Reaktion auf die Benachrichtigung über eingetretene Datenänderungen.

---

<sup>7</sup>WAN - Wide Area Network; LAN - Local Area Network

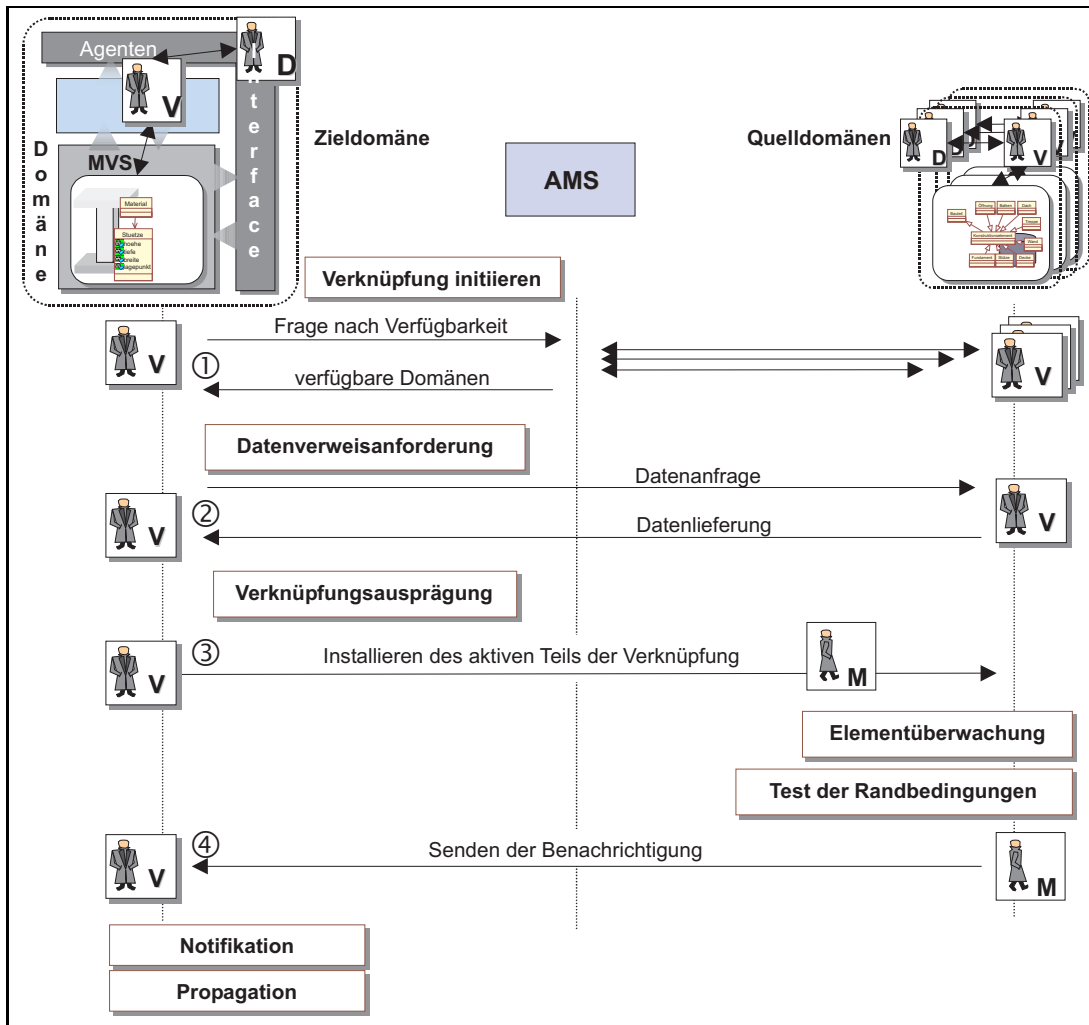


Abbildung 5.12: Abarbeitung informierender Verknüpfungen

Auf spezifische Erstellungs- und Ausführungsdetails wird noch einmal im Rahmen der Beschreibung des in dieser Arbeit entwickelten Systemkonzepts (Kapitel 6) eingegangen.

### 5.3.4 Verknüpfungsspeicherung

Die Definition der Verknüpfungstypen und deren anschließende Ausprägung zu Verknüpfungen stellt einen sehr zeitintensiven Prozeß dar, welcher ein großes Potential an domänenübergreifendem Fachwissen erfordert.

Voraussetzung zur effizienten Gestaltung dieses Prozesses ist zunächst die Verfügbarkeit vordefinierter Verknüpfungstypen entsprechend der gegebenen partialmodellübergreifenden Beziehungen.

Die aus dynamischen Modellmodifikationen resultierenden Neudefinitionen von Verknüpfungstypen müssen demnach persistent gespeichert werden. So kann bei späterer projektspezifischer Verwendung der entsprechenden Partialmodelle auf das im Zuge der Verknüpfungsdefinition fixierte und archivierte Fachwissen zurückgegriffen werden.

Im Rahmen der agentenbasierten Verknüpfungsverwaltung ist in diesem Zusammenhang eine agentengestützte fallbasierte Zuordnung der verwendeten Partialmodelle und der zugehörigen Verknüpfungstypen möglich. Hierzu müssen entsprechende Agenten zu Projektbeginn die aktuell involvierten Partialmodelle und die zur Verfügung stehenden Verknüpfungstypen analysieren und adäquate Vorschläge unterbreiten (s. Abbildung 5.13).

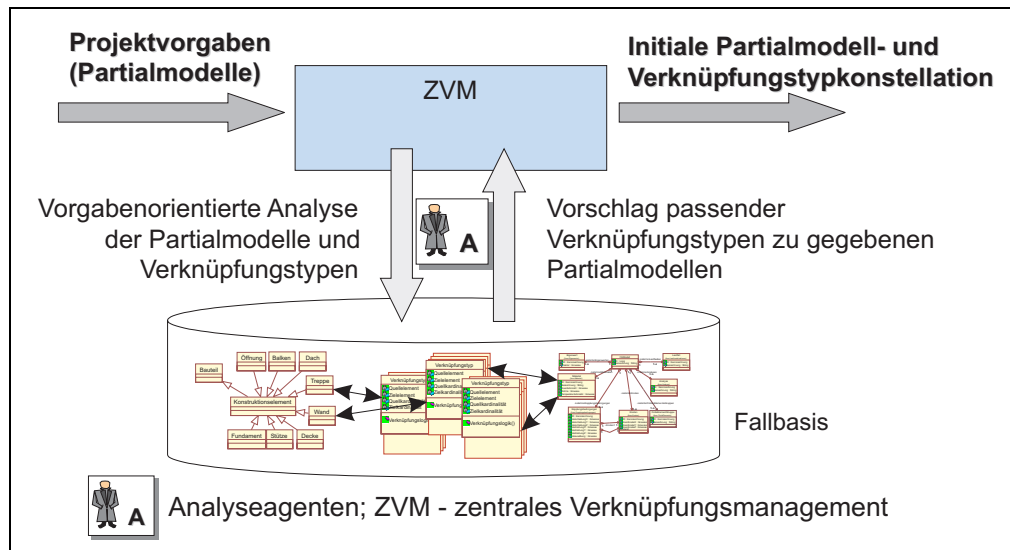


Abbildung 5.13: Fallbasierte Verknüpfungstypzuordnung

Die zweite grundlegende Voraussetzung zur effizienten Gestaltung der kommunikativen und kooperativen Arbeitsabläufe der Lebenszyklusbeteiligten besteht in der persistenten Speicherung und Verfügbarkeit der während der Laufzeit des Projektes spezifizierten Verknüpfungen. Es würde insbesondere einen nicht vertretbaren zeitlichen Aufwand bedeuten, die entsprechenden Verknüpfungen bei jedem Zugriff auf die diversen Partialmodelle (Quellmodelle) neu spezifizieren zu müssen.

Diesbezüglich wurde die Verwendung des vom W3C (World Wide Web Consortium) verabschiedeten XSLT<sup>8</sup> Sprachstandards zur dauerhaften und projekt- bzw. systemunabhängigen Speicherung der Verknüpfungstypen und Verknüpfun-

<sup>8</sup>Extensible Stylesheet Language Transformations[XSL01]

gen untersucht [Dom01b]. Auf Basis in XML<sup>9</sup> formulierter Partialmodelle läßt sich deren Beziehungsgefüge mittels XSLT prinzipiell nachbilden und archivieren.

### 5.3.5 Verknüpfungsexploration

Aus integrativer Sicht und speziell im Sinne der koordinierten Kooperation der Beteiligten ist es notwendig, daß jeder Beteiligte auf sämtliche für ihn relevante Informationen bezüglich des Gesamtvorhabens bzw. des Gesamtplanungsgegenstandes zugreifen und sich über die aktuellen Planungsstände (Datenausprägungen) in anderen Domänen informieren kann.

Hierzu ist die Darstellung aller verfügbaren Informationen der verschiedenen domänenspezifischen Betrachtungsaspekte zu bestimmten Entwurfsobjekten bzw. Abschnitten notwendig.

Zu diesem Zweck wird im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten verknüpfungsbasierten Ansatzes ein zentrales Verknüpfungsmanagement (ZVM) innerhalb der zentralen Komponente vorgeschlagen.

Das ZVM ist über die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Domänen informiert. Dies wird durch die Kommunikation der Verknüpfungs- bzw. Domänenagenten mit dem Navigationsagent im ZVM gewährleistet.

Zur detaillierten Analyse der vorhandenen Entwurfsobjekte können auf Basis des durch die Verknüpfungen ausgeprägten Beziehungsgefüges Informationen über:

- die an der Bearbeitung spezieller Entwurfsobjekte beteiligten Domänen (Personen, Applikationen)
- den aktuellen Bearbeitungsstand der Entwurfsobjekte in anderen Domänen
- mittel- und unmittelbare Voraussetzungen bzw. Abhängigkeiten zwischen Entwurfsobjekten

eingeholt werden. Hierzu sind spezielle Filter- bzw. Anfragemechanismen zur Selektion entsprechender Entwurfsobjekte, Bearbeiter oder Domänen vorzusehen (s. Abbildung 5.14 *Analyse*).

Des weiteren bildet das zentrale Verknüpfungsmanagement die Grundlage zur Repräsentation eines Gesamtdatenbestandes. Dabei werden die Verknüpfungsinformationen verwendet, um aus den ursprünglich verteilt vorliegenden Bauwerksmodelldaten eine umfassende Darstellung aller korrespondierenden Partialmodellinhalte zu synthetisieren.

Bei Vorhandensein einer geometrisch-graphischen Repräsentation der Entwurfsobjekte (s. Abschnitt 6.3.1) ist somit eine Darstellung des Planungsgegenstandes als „Virtuelles Bauwerk“ möglich (vgl. Abbildung 5.14 *Synthese*).

---

<sup>9</sup>Extensible Markup Language [XML01]



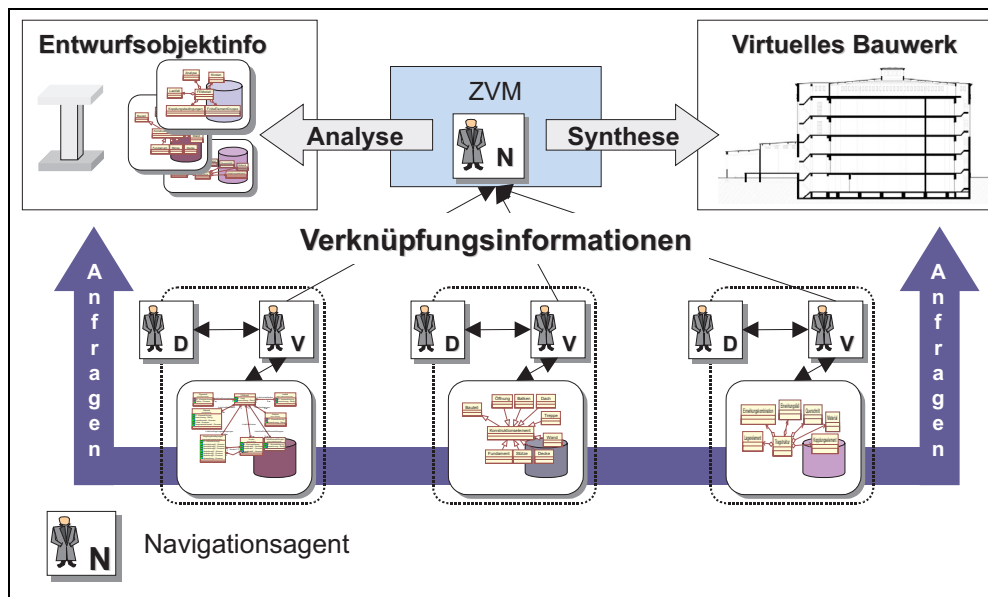


Abbildung 5.14: Gesamtdatenbestand extrahiert aus Verknüpfungen

## 5.4 Zusammenfassung

Im hier zugrundeliegenden verknüpfungsbasierten Ansatz wird die Kohärenz der Partialmodelle innerhalb des Bauwerksmodellverbundes in Form von Verknüpfungen abgebildet. Dieses verteilt zu organisierende System aus dynamisch modifizierbaren Partialmodellen und dem entsprechend anpaßbaren Beziehungsgefüge weist einen hohen Grad an Verteilung, Komplexität und Dynamik auf.

Für die Verwaltung und Beherrschung derartiger Systeme eignet sich die Verwendung von Multiagentensystemen, wie in Abschnitt 5.2.2 nachgewiesen wurde.

Die Verwaltung der verschiedenen domänenübergreifenden Verknüpfungen im Sinne koordinierter Kooperation läßt sich adäquat durch den Einsatz kommunizierender Agenten unterstützen. Durch eine standardisierte nachrichtenbasierte Kommunikation können sowohl Aspekte hinsichtlich der Verteilung als auch hinsichtlich der systemspezifischen Dynamik des Modellverbundes und der Partialmodelle sehr flexibel unterstützt werden.

Die Definition der Verknüpfungstypen sowie die Spezifikation der Verknüpfungen können durch den Einsatz intelligenter Verknüpfungsagenten (Assistenten) enorm erleichtert werden. Die Verknüpfungsagenten können hilfreiche Mechanismen zur Vorauswahl bestimmter Verknüpfungstypen und korrespondierender Modellelemente (gerade auch in Abhängigkeit der spezifischen fachplanerischen Vorlieben und Gewohnheiten) bereitstellen, wenn bei ihnen Eigenschaften wie Lernfähigkeit und Schlußfolgerungsvermögen ausgeprägt sind.

Der geforderten asynchronen Kooperation innerhalb von Planungsvorgängen wird einerseits durch die nachrichtenbasierte Kommunikation und andererseits durch den Einsatz mobiler Agenten Rechnung getragen. Die mobilen Agenten leisten zudem einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion des in verteilten Systemen naturgemäß anfallenden zeit- und kostenintensiven Netzverkehrs.

Auch zur effizienten Abarbeitung informierender und propagierender Verknüpfungen, welche durch Datenänderungen ausgelöst werden, eignen sich Agenten. Deren Autonomie und die Fähigkeit auf eintretende Ereignisse adäquat zu reagieren, prädestinieren hierbei ihren Einsatz.

Ausgehend von der in Kapitel 4 dargelegten konzeptuellen Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten verknüpfungsbasierten Bauwerkmodellierungsansatzes und den in diesem Kapitel erörterten Verknüpfungsverwaltungsaspekten wird im folgenden Kapitel ein Systemkonzept zur technischen Realisierung eines derartigen Bauwerksmodellansatzes und einer entsprechenden Verwaltung vorgeschlagen.

Eine Prinzipievaluierung dieses Systemkonzeptes wird anschließend anhand der Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimentalanwendung vorgenommen.

# Kapitel 6

## Systemkonzept

Den Hauptgegenstand dieses Kapitels bilden die Vorstellung und Diskussion des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten IT-Systemkonzepts. Dieses Systemkonzept illustriert, wie die in den vorangegangenen Kapiteln vorgeschlagenen und als zweckmäßig eingeschätzten Ansätze hinsichtlich der integrativen Bauwerkslebenszyklusunterstützung in einem Gesamtsystem kombiniert werden können. Den zweiten Teil dieses Kapitels stellt die Beschreibung der partiell durchgeführten prototypischen Umsetzung des Systemkonzepts und einer dementsprechenden Evaluierung der innerhalb dieser Arbeit entwickelten Konzepte dar.

Die Gesamtzielstellung dieser Arbeit besteht darin, ein adäquates Konzept zur Schaffung einer umfassenden Integrationsebene für die im Lebenszyklus eines Bauwerkes beteiligten Fachplaner und -applikationen zu entwickeln. In diesem Sinn wird das in diesem Kapitel vorzustellende Systemkonzept zunächst in seiner integrierenden Gesamtheit dargelegt. Anschließend werden, der Chronologie dieser Arbeit folgend, die verschiedenen Komponenten des Systems detailliert und diskutiert. Hierbei wird an den entsprechenden Stellen direkt auf deren prototypische Realisierung eingegangen. Anschließend erfolgt die Beschreibung der auf Basis der prototypisch realisierten Systemkomponenten durchgeführten experimentellen Anwendung des Systems.

Das Kapitel schließt mit der Bewertung des Gesamtsystemkonzeptes hinsichtlich seiner Eignung als Grundlage zur Realisierung des verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierungsansatzes.

### 6.1 Gesamtsystemkonzept

Basierend auf den dargelegten kooperations- und kommunikationsunterstützten Integrationskonzepten lassen sich die folgenden wesentlichen Komponenten hinsichtlich des Systemkonzeptes identifizieren:

- domänenspezifische Fachplaner und -applikationen
- variierbarer Bauwerksmodellverbund aus domänenspezifischen, dynamisch adaptierbaren Partialmodellen
- Verknüpfungstypen und Verknüpfungen zur Schaffung eines dynamisch anpaßbaren domänenübergreifenden Beziehungsgefüges
- agentenbasierte koordinierende Verknüpfungsverwaltung.

Aus diesen Grundbausteinen ergeben sich zunächst die in Abbildung 6.1 grob dargestellten Ebenen des Systemkonzepts.

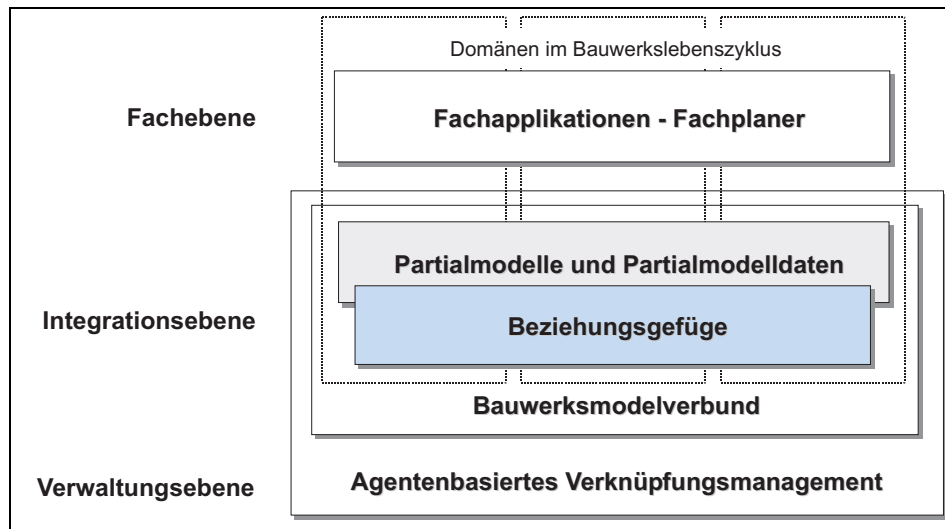


Abbildung 6.1: Systemkonzeptebenen

Diese einzelnen Ebenen nochmals untersetzend und dabei speziell das Zusammenwirken der Bestandteile fokussierend, läßt sich folgendes Gesamtsystemkonzept entwickeln (s. Abbildung 6.2).

Die Abbildung verdeutlicht dabei, daß die verschiedenen in den Lebenszyklus eines Bauwerkes involvierten Fachplaner und Applikationen domänenspezifische Sichten auf das zu planende bzw. zu erstellende Bauwerk besitzen. Korrespondierend zu den domänenspezifischen Sichten und applikationsabhängigen Fachmodellen existieren abstrahierte Partialmodelle, welche die jeweiligen Datenanforderungen der entsprechenden Domänen in normierter Form repräsentieren.

Zur Adaption, Ausprägung und zur Verwaltung der Partialmodelle und ihrer entsprechenden Instanzen (Daten) wird pro Domäne ein Modellverwaltungssystem eingesetzt.

Die Kohärenz der Partialmodelle wird über Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen abgebildet. Diese Verknüpfungen integrieren die Partialmodelle zu einem Bauwerksmodellverbund, welcher verteilt organisiert eine hybride Modellar-

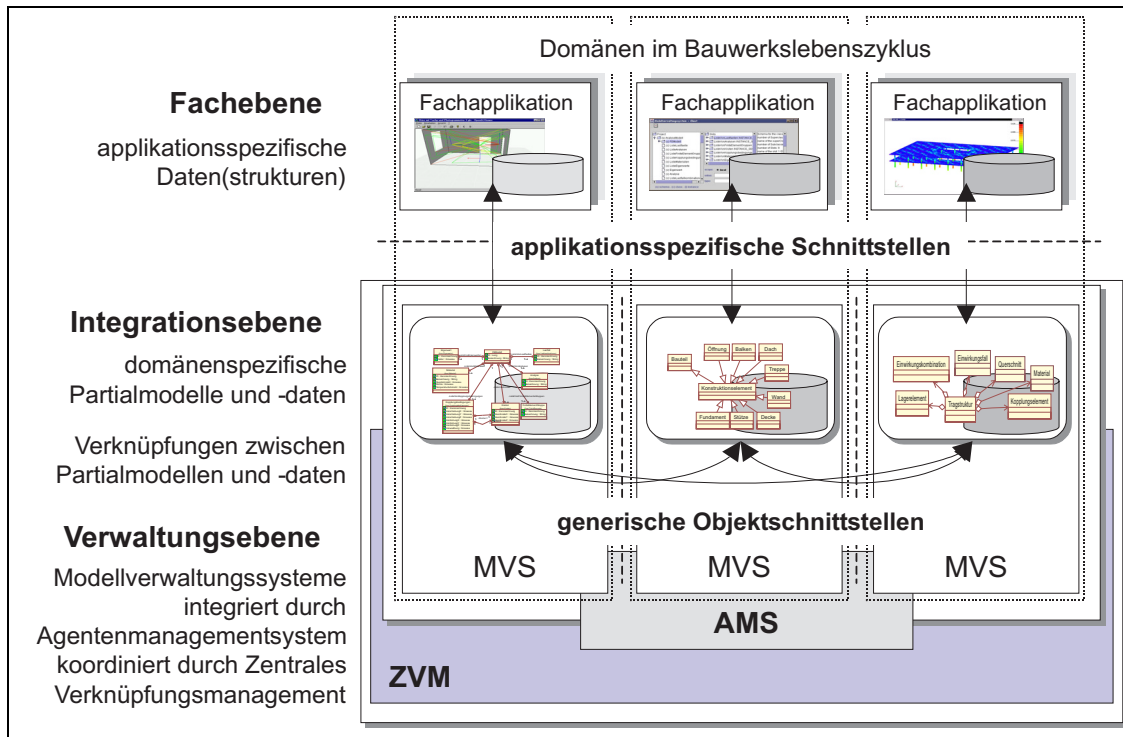


Abbildung 6.2: Gesamtsystemkonzept

chitektur aufweist. Der hierzu notwendige verknüpfungsbasierte und durch Agenten vollzogene Partialmodellzugriff innerhalb dieses Verbundes wird durch ein Multiagentensystem inklusive eines Agentenmanagementsystems unterstützt. Für diesen Zugriff besitzen die Modellverwaltungssysteme Schnittstellenfunktionalität, welche außerdem der Anbindung der Fachapplikationen an die Partialmodelle dient.

Die Koordination der durch die Verknüpfungen beschriebenen Informations- und Datenanforderungen übernimmt ein übergeordnetes Verknüpfungsmanagementsystem.

Auf Basis der in Abbildung 6.2 illustrierten Systemebenen und -komponenten läßt sich prinzipiell der verknüpfungsbasierte Modellierungsansatz als Grundlage einer integrierten Arbeits- und Planungsumgebung für die Beteiligten im Bauwerkslebenszyklus realisieren.

Zur tatsächlichen prototypischen Umsetzung dieser Konzeption sind jedoch weitere detaillierende und spezialisierende Untersetzungen der Einzelkomponenten notwendig. Diesbezüglich werden die einzelnen Komponenten im folgenden genauer betrachtet, wobei insbesondere auf deren Berührungspunkte und Beziehungen untereinander fokussiert wird.

## 6.2 Systemkomponenten

Die im letzten Abschnitt aufgeführten Systemkomponenten müssen so konzipiert werden, daß sie ihren Aufgaben gerecht werden, sich hard- und softwaretechnisch umsetzen lassen und außerdem möglichst optimal harmonieren. Dies stellt, wie in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich dargelegt, besondere Anforderungen an die Modellverwaltungssysteme und deren Schnittstellen, an das Multiagentensystem zur Verknüpfungserstellung und -abarbeitung sowie an die domänenübergreifende koordinierende Verknüpfungsverwaltung.

### 6.2.1 Bauwerksmodellverbund

Der aus domänenspezifischen, verknüpften Partialmodellen bestehende Bauwerksmodellverbund bildet den integrativen Kern der Systemkonzeption.

Die Grundlage zur Verwaltung der Partialmodelle bilden in diesem Zusammenhang die Modellverwaltungssysteme innerhalb der Domänen. Sie stellen die notwendige Funktionalität hinsichtlich der:

- dynamischen Erstellung und Modifikation der Partialmodelle,
- Ausprägung der Modelldaten,
- persistenten Speicherung der Modelle und Daten und
- Analyse und Verwendung der Modelle und Daten

zur Verfügung. Zu diesem Zweck sind die Modellverwaltungssysteme entsprechend den in den Abschnitten 3.4 und 3.4.2 dargelegten Ausführungen zu konzipieren.

Ein wesentliches Merkmal dieser Konzeption ist die Bereitstellung einer Schnittstelle, welche die oben aufgeführte Funktionalität implementiert und zur externen Nutzung zur Verfügung stellt. Diese bereitgestellte Funktionalität zum lesenden und schreibenden Zugriff auf die durch die MVS verwalteten Modelle und Daten muß als generische Schnittstelle gleichgestaltig zu allen Partialmodellen ausgeprägt sein. Nur so können laufzeitdynamische Veränderungen an den Modellen vorgenommen und zur weiteren Bearbeitung herangezogen werden (vgl. Abschnitt 3.4.1).

**generische**  
SCHNITTSTEL-  
LEN ZU  
PARTIAL-  
MODELLEN

Zu den Komponenten, welche über diese Schnittstellenfunktionalität auf die Partialmodelle zugreifen, gehören die MVS-Clients, die Domänenagenten und die Verknüpfungsagenten.

Die MVS-Clients dienen dabei der Analyse und Modifikation der Partialmodelle. Mit ihrer Hilfe können die Fachplaner (entsprechende Berechtigungen vorausgesetzt) direkt auf die Partialmodelle zugreifen.

Die zweite Anwendung der MVS-Clients besteht in der Realisierung und Kapselung applikationsspezifischer Schnittstellen. Hierbei müssen Partialmodellinhalte in die speziellen Applikationsmodelle transformiert werden (und umgekehrt).

**applikations-  
spezifische  
Schnittstel-  
len auf Basis  
generischer  
MVS-  
Funktionalität**

Zur Gewährleistung der plattformunabhängigen Interoperabilität zwischen den Modellverwaltungssystemen untereinander und zwischen den MVS und den Fachapplikationen wurden die Modellverwaltungssysteme in eine CORBA-Umgebung eingebettet [MZ95] [SS95] [Sie96].

Die Domänen- und Verknüpfungsagenten verwenden ebenfalls die vom MVS bereitgestellte generische Schnittstellenfunktionalität, um einerseits den Zugriff auf die Partialmodelle im Sinne des Bauwerksmodellverbundes zu realisieren (Domänenagenten) und um andererseits die Erstellung und Abarbeitung speziell der generierenden und propagierenden Verknüpfungen zu ermöglichen (s. Abschnitt 6.2.3). Eine detaillierte Darstellung des MVS und der in Beziehung stehenden Komponenten erfolgt in Abbildung 6.3.

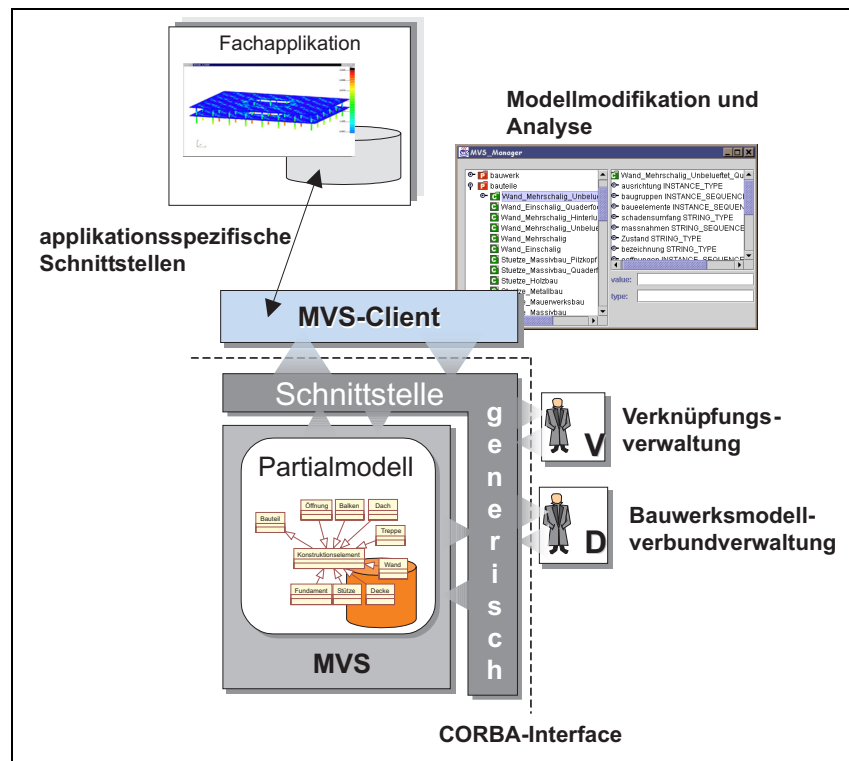


Abbildung 6.3: Modellverwaltungssystemkomponente

## Prototypische Umsetzung

Die Modellverwaltungssysteme sind in der aktuellen prototypischen Umsetzung als Smalltalksysteme (VisualWorks®, Release 3.0 der Firma ObjectShare, Inc.© 1998) implementiert. Die eingesetzte Smalltalkplattform bietet eine CORBA-konforme Implementation (ObjectShare Distributed Smalltalk Release 5.7© 1996-1998 ObjectShare, Inc.© 1993-1995 Hewlett-Packard Company), mit Hilfe derer die Interoperabilitätsaspekte hinreichend Unterstützung finden.

Von größerer Bedeutung ist jedoch der bezüglich Smalltalk zu nennende Vorteil, daß es als interpretierendes System effiziente Möglichkeiten zur Abbildung der dynamischen Aspekte der Modellverwaltung (Modellmodifikationen zur Programmausführung) zur Verfügung stellt und sich somit exzellent als Implementationsbasis für die Umsetzung der oben geforderten Funktionalität eignet<sup>1</sup>. Diese Funktionalität wurde auf Basis der AKO-Schnittstelle umgesetzt. Die AKO-Schnittstelle stellt einen elementaren Satz von Datentypen und Funktionen zum generischen Zugriff auf Modelle und Daten bereit (s. Abschnitt 3.4.1). Eine ausführliche Beschreibung der Elemente und Funktionen der Schnittstelle kann [Arb01] entnommen werden.

Im Sinne der Interoperabilität wurde diese Schnittstelle in IDL formuliert, woraus sich mittels IDL-Compilern effizient Grundgerüste für Server- und Client-Applikationen generieren lassen.

Die in erster Instanz auf die Modellverwaltungssysteme zugreifenden MVS-Clients wurden in JAVA umgesetzt. Die Begründung hierfür wird im Abschnitt 6.2.2, welcher auf die prototypische Implementierung der ebenfalls in JAVA entwickelten Link-Clients eingeht, gegeben.

### 6.2.2 Beziehungsgefüge

Die Basis des zwischen den Partialmodellen abzubildenden und zu verwaltenden Beziehungsgefüges stellen die Verknüpfungstypen und die daraus zu instanziierten Verknüpfungen dar.

Die Verknüpfungstypen beschreiben auf Klassenbasis unidirektionale Abhängigkeiten zwischen Quell- und Zielpartialmodellelementen verschiedener Domänen. Aus den domänenspezifischen Verknüpfungstypen werden Verknüpfungen ausgeprägt, wobei konkrete Instanzen der Ziel- und Quellmodelle zugeordnet werden. Bezüglich der Systemkonzeption benötigt somit jede Domäne adäquate Werkzeuge zur Erstellung und Modifikation sowie zum Laden und persistenten Speichern existierender Verknüpfungstypen und Verknüpfungen. Weiterhin muß jede Domäne über geeignete Werkzeuge zur Abarbeitung der Verknüpfungen verfügen. Diese Funktionalität wird durch die Link-Clients zur Verfügung gestellt. So wie auch bei den MVS existiert pro Domäne genau einer dieser identisch implemen-

**Link-Clients**  
ZUR VER-  
KNÜPFUNGS-  
VERWALTUNG

<sup>1</sup>Hauptsächlich aus Wartbarkeits- und Kompatibilitätsaspekten wird im Teilprojekt D3 des SFB 524 derzeit eine java-basierte Neuentwicklung des MVS vorgenommen [Wei01].



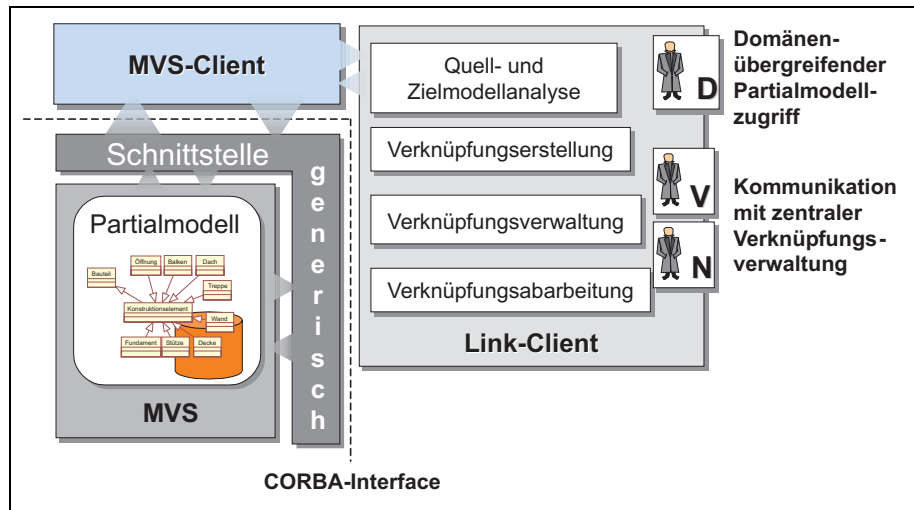


Abbildung 6.4: Einordnung des Link-Clients

tierten Link-Clients (s. Abbildung 6.4). Die Aufgabe eines Link-Clients besteht demnach in der Bereitstellung folgender Funktionalität:

- domänenübergreifender Zugriff auf die Partialmodelle und Partialmodell-daten
- dynamische Definition von Verknüpfungstypen
- Spezifikation von Verknüpfungen auf Basis selektierbarer Verknüpfungstypen
- Laden und Speichern existierender Verknüpfungstypen und Verknüpfungen
- Realisierung der Verknüpfungsabarbeitung
- Bereitstellung der domänenspezifischen Verknüpfungen für die Verwaltung durch das zentrale Verknüpfungsmanagement.

Aus systemtechnischer Sicht stellen die Link-Clients die wichtigste Komponente zur Unterstützung des in dieser Arbeit vorgeschlagenen verknüpfungsbasierten Bauwerksmodellierungsansatzes dar. Mit ihrer Hilfe wird das Beziehungsgefüge zwischen den Domänen technisch abgebildet und domänenspezifisch verwaltet. Zum Zweck der Verknüpfungstypdefinition und der Verknüpfungsspezifikation verwendet der Link-Client die Funktionalität des MVS-Clients, um die entsprechenden Partialmodelle und -daten zur Analyse und zum Zugriff bereitzustellen. Im Rahmen der Verknüpfungsabarbeitung wird wiederum die Schnittstellenfunktionalität der MVS direkt verwendet, um entsprechend den Verknüpfungen datenmanipulierend auf die Partialmodelle einzuwirken.

## Mappingsprachen

Zur Beschreibung der Verknüpfungen oder auch Mappings (vgl. Abschnitt 4.2) zwischen den Partialmodellen werden in der Regel Mappingsprachen verwendet. Hierunter sind formale computerinterpretierbare Notationen zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Modellelementen der jeweiligen Partialmodelle zu verstehen. Die resultierende formale Beschreibung wird dann durch entsprechende Kompilertechniken den Fachapplikationen bzw. Modellverwaltungen zur Verfügung gestellt. Diese erlangen durch die erzeugten Programmkonstrukte Zugriff auf die entsprechenden verknüpften Elemente. Typische Vertreter dieser Mappingsprachen sind vor allem die verschiedenen prozedural orientierten EXPRESS-basierten Dialekte EXPRESS-M, EXPRESS-V und EXPRESS-C, welche vornehmlich zur Überführung bzw. Zusammenführung in EXPRESS formulierter Modelle dienen. Vorteile dieser Mappingsprachen sind ihre gute Einordnung in die Gesamtphilosophie STEP/EXPRESS und die damit verbundene Verfügbarkeit vieler professioneller Tools und Umgebungen.

Des weiteren sind hier die deklarativen Mappingsprachen VML (View Mapping Language [AH95] [Amo97]) oder das eigentlich rein zum Datenaustausch zwischen Applikationen entwickelte KIF (Knowledge Interchange Format) zu nennen.

Weitere Ausführungen und Erläuterungen zu Mappingsprachen allgemein und partiell auch ausführliche Bewertungen der verschiedenen Sprachen sind beispielsweise [VLA95] [Amo97] [Was97] [Eas99] zu entnehmen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde aus folgenden Gründen auf die explizite Verwendung derartiger Mappingsprachen verzichtet:

- Die Spezifikationen der Mappingsprachen sind größtenteils sehr komplex und daher Fachplanern zur Erstellung von Verknüpfungen kaum zuzumuten.
- Diese komplexen Sprachen bedingen ausgereifte Tools (Scanner, Parser) zur Interpretation bzw. Kompilierung der Spezifikationen.
- Die durch die Mappingsprachen definierten Mappings sind auf Grund ihrer Philosophie hinsichtlich Spezifikation und Implementation in der Regel zu starr, um der Dynamik des verknüpfungsbasierten Ansatzes Rechnung zu tragen.

## Zentrales Verknüpfungsmanagement

Der detaillierten Beschreibung der Aufgaben des zentralen Verknüpfungsmanagements in Abschnitt 5.3.5 folgend, besteht das Ziel dieser Komponente in der domänenübergreifenden Darstellung des Gesamtbeziehungsgefüges. Basierend auf der Darstellung der Verknüpfungen kann durch die Partialmodelle navigiert werden, um Informationen zum aktuellen Gesamtprojektstand zu ermitteln.

Auch diese Funktionalität zur Darstellung sämtlicher Verknüpfungen und zur Navigation innerhalb des daraus resultierenden Verknüpfungsgefüges wird durch den Link-Client zur Verfügung gestellt.

Zu diesem Zweck muß der Link-Client über Informationen zu allen existierenden Verknüpfungen der jeweiligen Domänen verfügen. Diese Informationen werden ihm über die Verknüpfungsagenten der einzelnen Domänen mitgeteilt.

### **Prototypische Umsetzung**

Die Link-Clients werden derzeit in JAVA (JAVA<sup>TM</sup> 2 Plattform, Standard Edition) implementiert. Java eignet sich zur Umsetzung der Link-Clients (wie auch der MVS-Clients). Da erstens die geforderte Plattformunabhängigkeit durch die JAVA-Philosophie unterstützt wird und zum zweiten existiert eine Vielzahl von CORBA-Implementationen, um die Einbettung der Applikationen in die angestrebte CORBA-Umgebung zu realisieren. In der vorliegenden prototypischen Umsetzung wurde hierzu die von Sun<sup>®</sup> (Sun Microsystems, Inc.) entwickelte CORBA-Implementation Java<sup>TM</sup> IDL verwendet. Drittens spricht für die Verwendung von JAVA als Entwicklungsumgebung die Tatsache, daß die Mehrzahl der verfügbaren Agentenplattformen in Java implementiert sind und als JAVA-Klassenbibliotheken vorliegen. Somit kann der Zusammenschluß der JAVA-Applikationen und der Agentenplattformen relativ problemlos realisiert werden.

### **6.2.3 Agentenbasierte Systemverwaltung**

Die agentenbasierte Systemverwaltung wird im vorliegenden Systemkonzept als Multiagentensystem ausgeprägt. Diesbezüglich werden verschiedene Agenten zur Erledigung spezifischer Aufgaben eingesetzt. Alle involvierten Agenten werden global durch ein Agentenmanagementsystem (AMS) koordiniert und verwaltet. Die Domänenagenten, welche lokal in den Domänen existieren sind, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, für die Verwaltung des Bauwerksmodellverbundes verantwortlich. Sie übernehmen das Registrieren bzw. An- und Abmelden der verschiedenen Domänen innerhalb des Verbundes, deren Existenz durch Anfragen an das AMS in Erfahrung gebracht werden kann.

Auf Basis dieser Informationen realisieren sie den Zugriff auf die Modellverwaltungssysteme und stellen somit in Kooperation mit den Verknüpfungsagenten die erforderlichen Daten zur Verknüpfungstypdefinition und zur Verknüpfungsspezifikation zur Verfügung.

Die lokalen Verknüpfungsagenten sind als intelligente Assistenten zu verstehen und unterstützen den Fachplaner bei der Erstellung und Abarbeitung der Verknüpfungstypen und Verknüpfungen. Im Zusammenspiel mit den Domänenagenten erledigen sie die Abarbeitung insbesondere der generierenden Verknüpfungen. Die Abarbeitung der informierenden und propagierenden Verknüpfungen wird mit Hilfe mobiler Agenten realisiert. Die Abbildung 6.5 stellt diese Zusam-

menhänge graphisch dar.

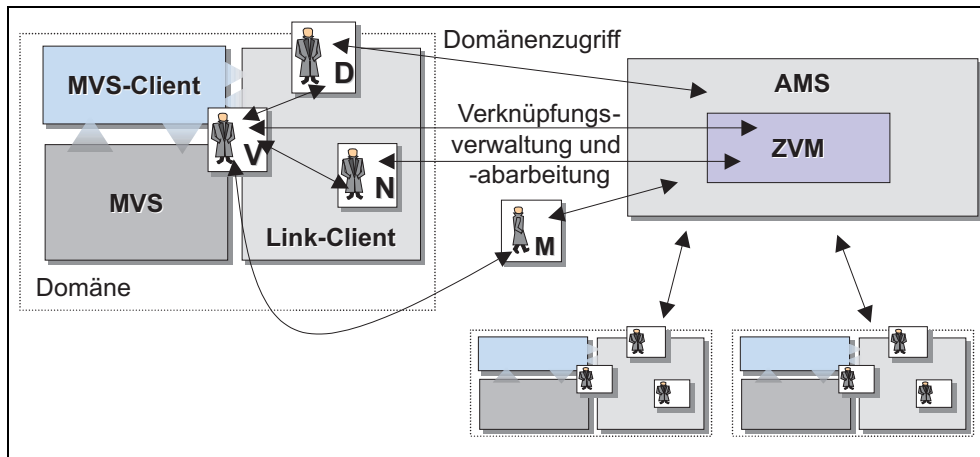


Abbildung 6.5: Systemkonzeptioneller Einsatz der Agenten

Die zentrale Verknüpfungsverwaltung ist in dem Sinn als zentral anzusehen, da sie die domänenspezifisch erstellten und verwalteten Verknüpfungen bündelt und den interessierten Link-Clients zur Verfügung stellt. Die eigentliche Darstellung und Analyse der Verknüpfungen und die Navigation im somit explorierbaren Gesamtdatenbestand geschieht jedoch wiederum lokal in Link-Clients.

Bei dem Agentenmanagementsystem handelt es sich um eine prinzipiell durch die Agentenplattform bereitgestellte zentrale Verwaltungseinheit, welche die im System befindlichen Agenten koordiniert.

Sie besitzt in der vorliegenden Konzeption zusätzlich die Aufgabe, mobile Agenten und gesendete Nachrichten temporär aufzunehmen (zu speichern), falls deren angesteuerte Zieldomänen (Migrationsziele) momentan nicht verfügbar sind.

### Prototypische Umsetzung

Die Vielzahl der verschiedenen Aufgaben der Agenten im Sinne der zugriffsorientierten Verwaltung der einzelnen Partialmodelle als Bauwerksmodellverbund, der Erstellung und Verwaltung der Verknüpfung sowie hinsichtlich deren Abarbeitung stellt erhebliche Anforderungen an die einzusetzende Agentenentwicklungsumgebung. Deshalb wurden Untersuchungen und prototypische Realisierungen sowohl auf Basis des Grasshopper Development Systems (Grasshopper Release 1.2<sup>©</sup> 1998 ikv++ GmbH Informations- und Kommunikationssysteme) [Gra01] und des JADE (JADE - Java Agent DEvelopment Framework<sup>©</sup> 2000 CSELT S.p.A.) [JAD01] Frameworks unternommen.

Im aktuell experimentierten Prototypen wird das Grasshopper-System eingesetzt, da es sich hierbei um eine sehr leistungsfähige und gut dokumentierte Agentenentwicklungsumgebung speziell zur Unterstützung der Verteilungsaspekte handelt. Zu vermerken ist dabei insbesondere die Unterstützung der Mobilität von

Agenten, welche wie bereits erwähnt zur Verarbeitung informierender und propagierender Verknüpfungen eingesetzt wird.

Die Nachteile dieser Entwicklungsumgebung liegen ganz klar in der rein methodenbasierten Kommunikation zwischen den Agenten, d.h. es wird keine nachrichtenbasierte Kommunikation basierend auf einer Agentenkommunikationssprache unterstützt (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Deshalb wurden alternative Lösungsansätze auf Basis des JADE-Frameworks erprobt. JADE unterstützt die FIPA-ACL konforme nachrichtenbasierte Kommunikation der Agenten, dafür aber keine Mobilität<sup>2</sup>.

Beide Aspekte sind in der vorgeschlagenen Systemkonzeption von entscheidender Bedeutung, weshalb in weiterführenden Forschungsarbeiten die Kombination beider Ansätze bzw. die Verwendung einer alternativen Agentenentwicklungsumgebung untersucht werden muß.

#### 6.2.4 Fachplaner und Fachapplikationen

Die tatsächlichen fachlich planerischen Entscheidungen im Lebenszyklus eines Bauwerkes werden durch die Fachplaner mit Hilfe spezieller ihnen zur Verfügung stehender Fachapplikationen getroffen. Deshalb ist es notwendig, sowohl die Fachplaner als auch deren domänenspezifische Fachapplikationen in die Gesamtsystemkonzeption zu integrieren.

Die Interaktion der Fachplaner mit dem Gesamtsystem und speziell mit den in das System integrierten Daten wird durch die Bereitstellung der MVS- bzw. Link-Clients unterstützt. Mit Hilfe dieser Werkzeuge sind die Fachplaner in der Lage, sich über die jeweiligen Partialmodellinhalte bzw. über den Gesamtdatenbestand zu informieren. Diese Informationen können zur Entscheidungsfindung bezüglich ihrer planerischen Aufgaben herangezogen werden.

Im Sinne eines effizienten Datenaustausches müssen auch die spezifischen Fachapplikationen in das Gesamtsystem integriert werden. Die Basis dieser Integration bildet, wie bereits in Abschnitt 6.2.1 dargelegt, die Schnittstellenfunktionalität der MVS-Clients.

Hierzu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine prototypischen Realisierungen vorgenommen. Auf die prinzipiell einsetzbare AKO-Schnittstelle ist bereits verwiesen worden.

---

<sup>2</sup>Die zuletzt genannten Bemerkungen beziehen sich auf die aktuell eingesetzten Versionen.

## 6.3 Experimentalanwendung

Die in dieser Arbeit dargestellten und diskutierten Konzepte wurden zu wesentlichen Teilen im Rahmen der Untersuchungen zum Sonderforschungsbereich (SFB) 524<sup>3</sup> entwickelt [Wei98] [Wei01].

Das Ziel des SFB 524 besteht in der Erforschung und Untersuchung neuer Methoden und Techniken bezüglich der bei Revitalisierungsvorhaben Verwendung findenden Werkstoffe und Konstruktionen.

In diesem Zusammenhang spielt auch die IT-technische Integration der verschiedenen Revitalisierungsbeteiligten zur effizienten Entscheidungsunterstützung eine wichtige Rolle.

Zur Schaffung einer integrativen Arbeits- und Planungsumgebung im Sinne eines Informations- und Kommunikationssystems für die Revitalisierung von Bauwerken wird in den aktuellen informationstechnisch integrativen Arbeiten im SFB 524 der in dieser Arbeit vorgeschlagene verknüpfungsbasierte Modellierungs- und Verwaltungsansatz eingesetzt.

Zur Evaluierung und Erprobung der verschiedenen entwickelten fachlich ingenieurtechnischen Methoden und Verfahren werden real revitalisierungsbedürftige Verifikationsobjekte herangezogen.

Eines dieser Objekte bzw. dessen exemplarische rechnerinterne Abbildung bildet die fachliche Basis der in diesem Abschnitt vorzustellenden Experimentalanwendung des verknüpfungsbasierten Ansatzes.

Diesbezüglich wurden durch Mitarbeiter im SFB verschiedene Partialmodelle definiert und entsprechend des Verifikationsobjektes instanziiert. Auf die detaillierte Beschreibung dieser Modelle wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da sie hinsichtlich der entwickelten verknüpfungsbasierten Konzepte nur untergeordnete Bedeutung besitzen.

Ausgehend von gegebenen Partialmodellen verschiedener Domänen wurden auf Basis der prototypisch umgesetzten Systemkonzeption die im folgenden vorgestellten verknüpfungsbezogenen Aspekte experimentiert.

### 6.3.1 Datenerfassung - Modellierung

Die bereitgestellten Partialmodelle wurden in die domänenspezifischen Modellverwaltungssysteme eingepflegt. Dabei wurden ein Tragwerksmodell (s. Abbildung 6.6) und ein Architekturmodell mit der zur Verfügung stehenden AKO-Funktionalität der MVS-Clients eingearbeitet, wobei das Architekturmodell auch instanziiert wurde (s. Abbildung 6.7).

---

<sup>3</sup>SFB 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ Dieser Sonderforschungsbereich wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

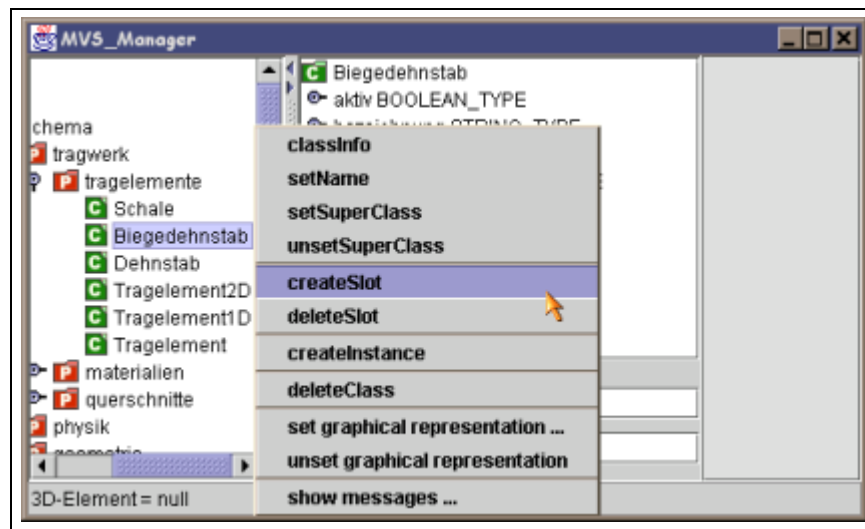


Abbildung 6.6: MVS-Darstellung des Tragwerksmodells

Das Tragwerksmodell umfaßt dabei die Spezifizierung der geometrischen und physikalischen Eigenschaften von Konstruktionselementen und ihres Beitrages zum Lastabtragverhalten des Bauwerkes und stellt damit ein analysierbares Modell aus Tragelementen und weiteren Randbedingungen (Einwirkungen und Lagerungsbedingungen) dar [WBFW01].

Das sogenannte Architekturmodell ist im Sinne eines Gestaltmodells als „konstruktive Gliederung“ aufzufassen und beinhaltet die Beschreibung eines Bauwerkes durch reale Konstruktionselemente wie Wände, Decken und Öffnungen und mögliche strukturelle Zusammenhänge sowie weitere beschreibende (beispielsweise multimediale) Informationen [Pet00] [WWPB00].

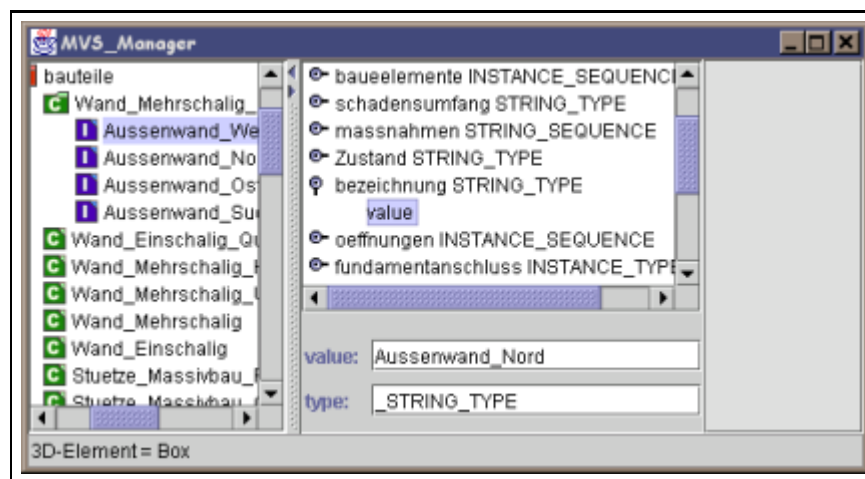


Abbildung 6.7: Instanziiertes Architekturmodell im MVS

Als wesentliches Hilfsmittel zur Identifikation der verschiedenen Modellelemente scheint deren geometrisch-graphische Repräsentation unabdingbar [HHS99]. Aus diesem Grund wurde auf Basis des JAVA3D Frameworks eine Darstellung der Modellelemente basierend auf den dort bereitgestellten Grundprimitiven realisiert. Durch die Dynamik der Partialmodelle muß es möglich sein, diese graphische Repräsentation dynamisch zuzuordnen und gegebenenfalls anpassen zu können. Deshalb wurde eine dem verknüpfungsbasierten Ansatz entsprechende Zuordnungsphilosophie gewählt.

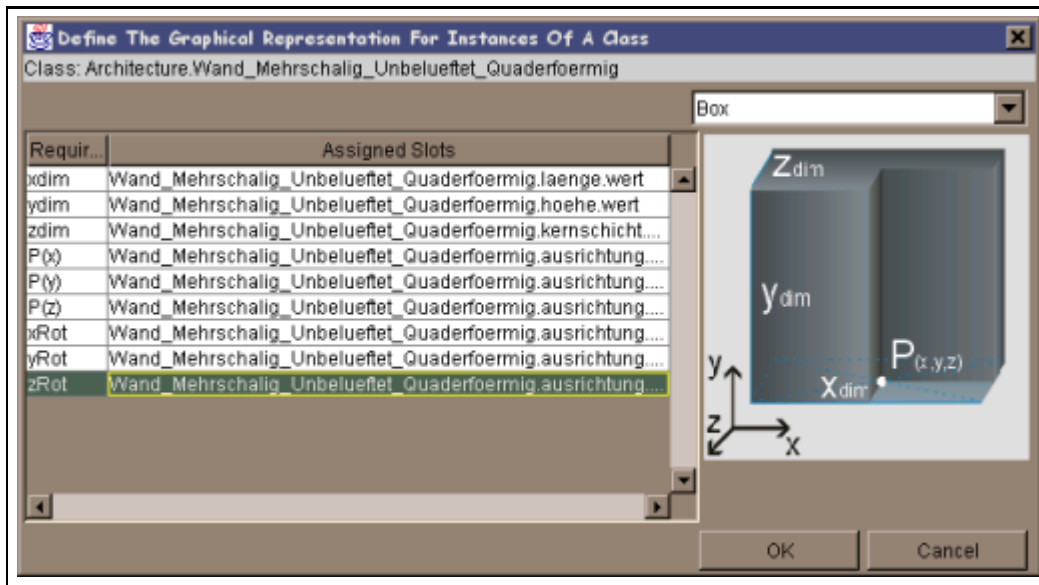


Abbildung 6.8: Zuordnung von JAVA3D Elementen zu Modellklassen

Danach kann einem Modellelement auf Klassenbasis eine graphische Repräsentation zugeordnet werden. Hierzu wird für die entsprechende Modellklasse zunächst ein Darstellungstyp gewählt (in der vorliegenden prototypischen Umsetzung Box, Cone, Cylinder, Sphere). Anschließend werden die geometrietragenden Attribute der Modellklasse (hierarchisch absteigend) mit den entsprechenden Parametern des Darstellungstyps in Beziehung gesetzt (s. Abbildung 6.8). Dabei werden die zu wählenden Attribute aus einer Darstellung sämtlicher verfügbarer in Beziehung stehender Modellelemente im Partialmodell selektiert.

Basierend auf dieser Zuordnung können die Instanzen der Modelle graphisch repräsentiert werden, wodurch insbesondere aus den erkennbaren geometrischen und topologischen Eigenschaften eine deutlich leichtere Identifikation der betrachteten Elemente resultiert.

Die so verwalteten und dargestellten Partialmodelle bilden damit einerseits die Grundlage zur händischen Exploration und Bearbeitung der Datenbestände innerhalb der diversen Domänen und andererseits die Basis zur qualifizierten Verknüpfungsdefinition und -spezifikation.



### 6.3.2 Verknüpfungsspezifikation und -abarbeitung

Die Spezifikation der Verknüpfungen erfolgt mit Hilfe der Link-Clients. Ein solcher Link-Client steht potentiell jedem Bearbeiter auf Fachplanungsebene zur Verfügung.

Die generierenden Verknüpfungen werden in der vorliegenden prototypischen Implementierung auf Basis vordefinierter Verknüpfungstypen erstellt. Hierzu wählt der Bearbeiter zunächst einen Verknüpfungstyp, welchen er instanziiert und die entsprechenden Quellinstanzen zuordnet (s. Abbildung 6.9).

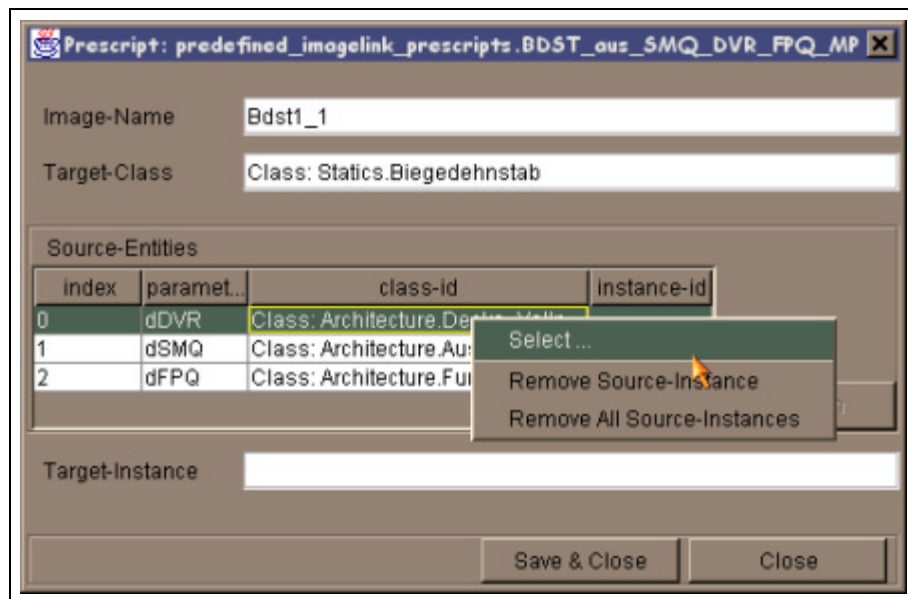


Abbildung 6.9: Zuordnung von Instanzen zu generierenden Verknüpfungen

Anschließend wird diese spezifizierte Verknüpfung gespeichert und kann jederzeit ausgeführt werden. Dabei werden die Zielinstanzen entsprechend der implementierten Überführungslogik des Verknüpfungstyps generiert.

Generierende Verknüpfungen, welche auf der direkten Wertüberführung bzw. Wertgenerierung zwischen Instanzen beruhen, können jederzeit definiert und spezifiziert werden. Die zugrundeliegenden Verknüpfungstypen, deren Überführungslogiken sich durch reine Wertsetzung auszeichnen, können dabei dynamisch definiert, anschließend spezifiziert (Zuordnung konkreter Instanzen) und zu einem beliebigen Zeitpunkt ausgeführt werden. Hierzu stehen ebenfalls verschiedene Dialoge zur Definition der Verknüpfungstypen und zur Zuordnung der Instanzen im Rahmen der Verknüpfungsspezifikation zur Verfügung, die an dieser Stelle nicht näher detailliert werden.

Im Gegensatz zu den generierenden Verknüpfungen erfordert die Spezifikation der informierenden Verknüpfungen keine explizite Definition eines zugrundelie-

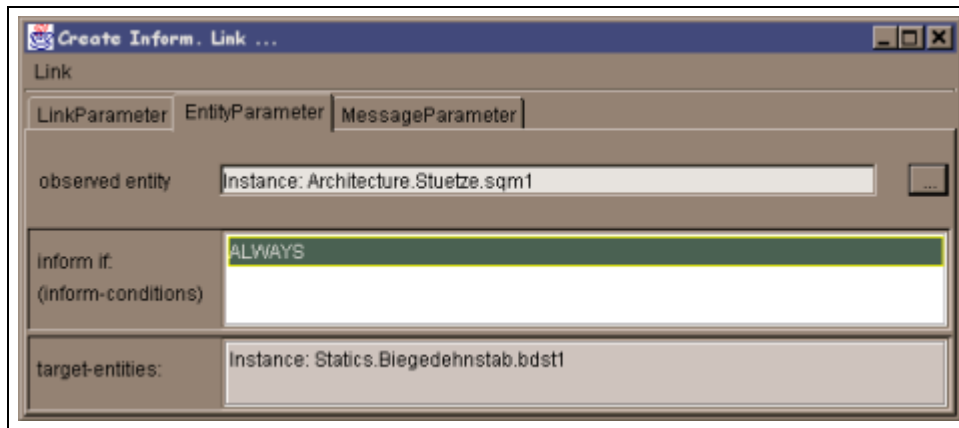


Abbildung 6.10: Quell- und Zielelemente informierender Verknüpfungen

genden Verknüpfungstyps. Dieser ist durch das im Framework implementierte Änderungserkennungs- und -managementsystem vorgegeben.

Die informierenden Verknüpfungen werden durch das Benennen zu überwachen-der Quellmodellelemente und damit in Beziehung stehender Zielelemente spezifiziert (s. Abbildung 6.10).

Dabei sind verschiedene weitere Parameter wie Erstellungszeit, erstellender Benutzer, Beginn der Aktivität (Überwachung) und beispielsweise die Priorität der Verknüpfung festzulegen (s. Abbildung 6.11)[Böh01]. Von besonderer Bedeu-

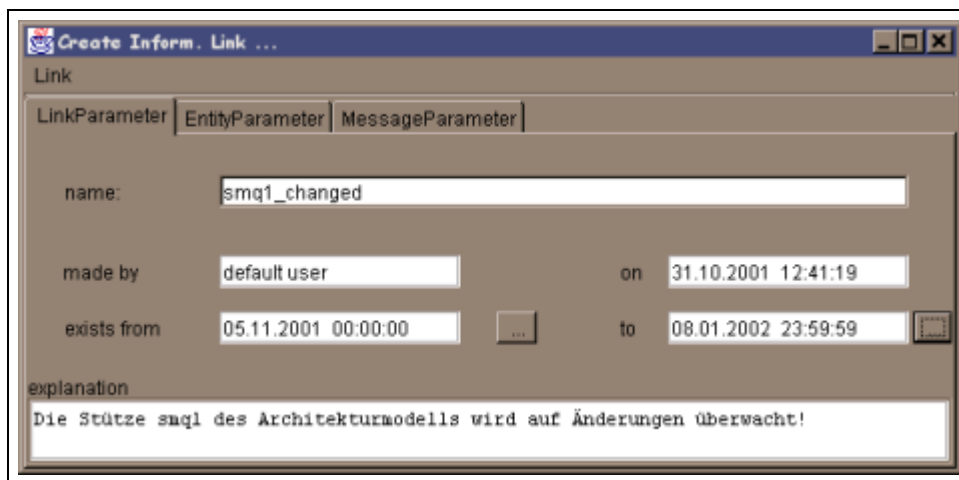


Abbildung 6.11: Verschiedene Parameter informierender Verknüpfungen

tung ist hierbei die Möglichkeit, die Verknüpfung mit bestimmten Bedingungen zu versehen (vgl. Abbildung 6.10), woraufhin die angestrebte Benachrichtigung gesteuert werden kann. Somit werden nur unter Voraussetzung der Erfüllung der gesetzten Bedingungen Nachrichten an die Zieldomäne ausgelöst, um eine unerwünschte Informationsflut zu vermeiden.

Auf Basis dieser, für den Anwender transparent in einen passiven Teil und einen aktiven Teil aufgesplitteten Verknüpfungen (s. Abschnitt 5.3.3), werden Nachrichten an die Zieldomäne ausgelöst.

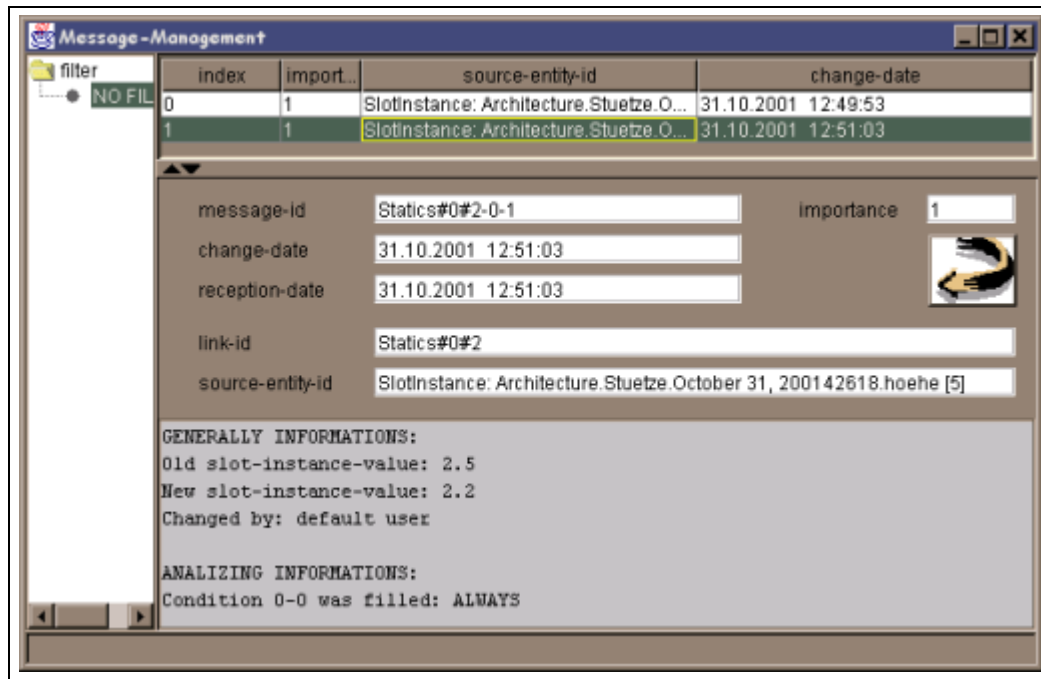


Abbildung 6.12: Nachrichtenzentrale zur Auswertung der Nachrichten

Diese werden mit Hilfe eines Nachrichten-Containers gesammelt und bei Bedarf den Verknüpfungserstellenden zugänglich gemacht (s. Abbildung 6.12). Der Nachrichten-Container erfüllt weiterhin den Zweck der persistenten Speicherung und der Sortierung und Filterung der eingegangenen Nachrichten nach verschiedenen Kriterien.

## 6.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der prototypischen Umsetzung des in dieser Arbeit entwickelten und zu Beginn des Kapitels vorgestellten Systemkonzepts kann dessen prinzipielle Realisierbarkeit demonstriert werden.

Der Prototyp besitzt die Funktionalität, auf der Basis vordefinierter Verknüpfungstypen generierende Verknüpfungen zu instanziiieren und bei Ausführung der Verknüpfungen die Daten im Zielmodell zu erzeugen.

An dieser Stelle sind jedoch noch weitere Untersuchungen zur Bereitstellung der Verknüpfungstypen und zu deren Abarbeitung notwendig. Insbesondere die dynamische Definition von Verknüpfungstypen wurde bisher nicht realisiert.

Ein praktikabler Stand wurde bei der prototypischen Implementierung der informierenden Verknüpfungen erreicht. Hierbei steht eine hinreichende Funktionalität zur Erstellung und Abarbeitung dieser Verknüpfungen zur Verfügung. Im Sinne weiterführender Arbeiten muß allerdings ein verbessertes Nachrichtenmanagement angestrebt werden. Hierzu sind in erster Linie effiziente Filtermechanismen zur Selektion und Darstellung relevanter Nachrichten zu entwickeln.

Einen bisher prototypisch nicht berücksichtigten Aspekt stellt die konzeptuell diskutierte zentrale Navigationsebene im Sinne der domänenübergreifenden Verknüpfungsexploration dar. Die damit in Zusammenhang stehende Verknüpfungsverfolgung bzw. verknüpfungsorientierte Navigation innerhalb des Gesamtdatenbestandes wurde bisher nicht umgesetzt.

# Kapitel 7

## Fazit

In den vorangegangenen Kapiteln wurde zunächst die aktuelle Situation im Bereich des Computereinsatzes im Bauwesen und speziell in der Bauplanung analysiert.

Im Rahmen dieser Analyse wurde festgestellt, daß die Prozesse im Bauwerkslebenszyklus durch einen hohen Grad an Komplexität und räumlicher und zeitlicher Verteilung der Ressourcen sowie durch eine hochgradige Spezialisierung der Fachplaner und -applikationen gekennzeichnet sind. Zudem sind sie von einer erheblichen Dynamik bezüglich der projektspezifischen Informationsanforderungen zwischen den beteiligten Fachplanern und Applikationen geprägt und deshalb nur schwer strukturier- und in ihrem Zusammenwirken beschreibbar.

Bezüglich dieser Situation wurde in Kapitel 2 konstatiert, daß die adäquate Unterstützung der zur effizienten und effektiven Bearbeitung von Planungsvorhaben notwendigen Kooperation und Kommunikation der Planungsbeteiligten eine integrierte Arbeitsumgebung erfordert.

Es wurde nachgewiesen, daß die Datenintegration, basierend auf einer deskriptiv orientierten rechnerinternen Abbildung des gemeinsamen Planungsgegenstandes, im Sinne eines virtuellen Bauwerkes eine notwendige Grundlage zur Schaffung einer derartigen Integrationsumgebung bildet.

Im Rahmen dieser Arbeit stellt ein digitales, verteilt organisiertes Bauwerksmodell die Basis der rechnerinternen Abbildung des gemeinsamen Planungsgegenstandes dar. Diesbezüglich wurde in Kapitel 3 dargelegt, daß ein dem objektorientierten Paradigma folgendes Bauwerksmodell, bestehend aus domänen-spezifischen Partialmodellen, besonders hinsichtlich der Komplexitätsreduktion und Verteilungsunterstützung, einen zweckmäßigen Ansatz bietet. Es wurde gezeigt, daß der im Bauwerkslebenszyklus gegebenen Dynamik durch dynamische Modellverwaltung auf der Basis entsprechender Modellverwaltungssysteme Rechnung getragen werden muß.

Die Aufspaltung des Gesamtbauwerksmodells in domänenspezifische Teilmodelle zieht die explizite Beschreibung eines die Partialmodelle verknüpfenden Beziehungsgefüges zur Abbildung der Kohärenz zwischen den Partialmodellen und zur Schaffung eines den Gesamtdatenbestand repräsentierenden Bauwerksmodellverbundes nach sich.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit der verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierungsansatz entwickelt und in Kapitel 4 vorgestellt.

Dieser integrierende Ansatz unterstützt die Kooperation und Kommunikation der Planungsbeteiligten, im Sinne der Gewährleistung des domänenübergreifenden Daten- und Informationsaustausches, durch ein explizit zu definierendes und zu spezifizierendes Beziehungsgefüge zwischen den Partialmodellen.

Dieses Beziehungsgefüge konstituiert sich aus Verknüpfungen, welche auf fachlicher Ebene zur Laufzeit des Projektes, basierend auf definierten Verknüpfungstypen, zwischen den Partialmodellelementen ausgeprägt werden.

Zur Unterstützung der verschiedenen kooperativen und kommunikativen Integrationsaspekte wurden unterschiedliche Arten und Kategorien von Verknüpfungen diskutiert. Hierbei werden speziell generierende Verknüpfungen zur Gewährleistung des Datenaustausches zwischen den Partialmodellen und informierende (propagierende und notifizierende) Verknüpfungen zur Etablierung eines effizienten Informationsaustausches unterschieden.

Parallel zur vorausgesetzten und im Ansatz berücksichtigten Dynamik der Partialmodelle und des Bauwerksmodellverbundes muß auch das Beziehungsgefüge im Hinblick auf die Verknüpfungstypen und Verknüpfungen dynamisch modifizierbar sein. Dies erfordert adäquate Methoden und Techniken der Beschreibung und Verwaltung der Beziehungen zwischen den Partialmodellen.

Um diese dynamische Verwaltung der Verknüpfungen zu gewährleisten und um die Aspekte der verteilten Bearbeitung auf Basis des verteilt organisierten Bauwerksmodellverbundes effektiv zu unterstützen, wurde die in Kapitel 5 diskutierte agentenbasierte Verknüpfungsverwaltung im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

Diese agentenbasierte Bauwerksmodellverwaltung setzt sich aus verschiedenen, für die Erledigung differenzierter Aufgaben der Erstellung und Verwaltung der Verknüpfungen verantwortlicher Softwareagenten zusammen, welche in ihrer Gesamtheit ein kooperativ koordiniertes Multiagentensystem bilden.

Als Grundlage der prototypisch technischen Realisierung einer derartig konzipierten integrierten Arbeitsumgebung für den Lebenszyklus von Bauwerken wurde in Kapitel 6 ein entsprechendes Systemkonzept vorgestellt. Im Zuge der Detaillierung der einzelnen Systemkomponenten wurde deren Zusammenwirken innerhalb eines Anwendungsszenariums dargestellt und prototypische Implementationsansätze unterbreitet.

## 7.1 Bewertung

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierungsansatz stellt einen hochgradig flexiblen Lösungsansatz zur Schaffung einer integrativen Arbeits- und Planungsumgebung für den Bauwerkslebenszyklus dar.

Basierend auf dynamisch modifizierbaren, domänenspezifischen, lediglich dem objektorientierten Modellierungsparadigma unterworfenen Partialmodellen, kann auf die Verwendung hochkomplexer, globaler (notwendigerweise zu standardisierender) Bauwerksmodelle verzichtet werden.

Die auf fachlicher Ebene laufzeitdynamisch erstellbaren Verknüpfungen bilden die Grundlage der flexiblen und redundanzfreien domänenübergreifenden Einbeziehung zu Projektbeginn unbekannter Daten(strukturen) und entsprechender Daten- und Informationsanforderungen durch die beteiligten Fachplaner und Applikationen.

Auf Basis dieser deskriptiv orientierten Bauwerksmodellierung ist der verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierungsansatz geeignet, die in ihrer Gesamtheit zu Projektbeginn nicht vorhersagbaren kooperations- und kommunikationsbezogenen Aspekte der Prozeßbearbeitung im Bauwerkslebenszyklus zu berücksichtigen. Besonders durch die Möglichkeiten der dynamischen

- Partialmodellmodifikationen,
- Variierbarkeit des Bauwerksmodellverbundes und
- Anpaßbarkeit des expliziten Beziehungsgefüges

können Informationsanforderungen zum Zeitpunkt ihres Entstehens einbezogen werden. Demnach stehen den involvierten Fachplanern und -applikationen jederzeit die für sie notwendigen zur Lösung der ihnen übertragenen Aufgaben relevanten Informationen zur Verfügung.

Die agentenbasierte Bauwerksmodell- bzw. Verknüpfungsverwaltung zur Erstellung, Speicherung und Abarbeitung der Verknüpfungen garantiert die geforderte Flexibilität hinsichtlich der Unterstützung der Dynamik der Modelle und des Modellverbundes und des persönlichen Freiraumes bzw. der Eigenständigkeit der involvierten Fachplaner.

Durch nutzerspezifische differenzierte Verknüpfungen sind die Fachplaner in der Lage, entsprechend ihren Zielvorgaben und Intentionen sowie entsprechend ihrer Intelligenz und Kreativität die zur Verfügung stehenden Informationen effizient zur Lösung ihrer Aufgaben zu verwenden. Diese flexibel erstellbaren Verknüpfungen und die Möglichkeit der Exploration des Gesamtdatenbestandes gewährleisten die Kooperation und Kommunikation der involvierten Fachplaner.

An dieser Stelle muß jedoch ausdrücklich auf die Problemhaftigkeit der Verknüpfungstypdefinition und der Verknüpfungsspezifikation durch die Fachplaner hingewiesen werden. In Abhängigkeit von der inhaltlichen Ausrichtung und der Strukturierung der Partialmodelle kann sich die Erstellung der Verknüpfungen als ein sehr komplexer Prozeß gestalten, welcher ein hohes Maß an partialmodellübergreifendem Wissen und Verständnis erfordert.

## 7.2 Ausblick

Das effiziente Arbeiten der Lebenszyklusbeteiligten auf Basis des verknüpfungsbasierten Ansatzes ist sehr stark von der Qualität und vom Umfang der zur Verfügung stehenden Partialmodelle und entsprechender Verknüpfungstypen und Verknüpfungen abhängig. Dies impliziert zwei wesentliche Ansätze für weitere Forschungsarbeiten.

Der erste Aspekt betrifft die projektinitiale Verfügbarkeit von adäquaten Partialmodellen und Verknüpfungen. Diesbezüglich wäre es wünschenswert, das aktuelle Projekt mit angepaßten Partialmodellen und vordefinierten Verknüpfungstypen zu beginnen. Hierzu sind insbesondere, wie in Kapitel 5, Absatz 5.3.4 vorgeschlagen, fallbasierte Lösungen zu untersuchen, um nicht für jedes Projekt sämtliche Partialmodelle, Verknüpfungstypen und Verknüpfungen neu erstellen zu müssen.

Der im Sinne der weiterführenden Forschung interessantere Aspekt betrifft die Unterstützung der Definition der Verknüpfungstypen und der Spezifikation von Verknüpfungen zur Laufzeit des Projektes. Hierbei sind vertiefende Methoden und Techniken zu untersuchen und zu entwickeln, welche sowohl auf struktureller als auch auf semantischer Ebene den Fachplaner bei der Erstellung der für ihn relevanten domänenübergreifenden Beziehungen unterstützen.

Die in Kapitel 5 Absatz 5.3.2 diskutierten Verknüpfungsagenten müssen hierzu mit entsprechendem domänen- bzw. fachspezifischen Wissen und der Funktionalität zur Interpretation und Bearbeitung dieses Wissens ausgestattet werden. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Untersuchungen zu Ontologien im Rahmen von Agentenkommunikationssprachen, um darauf aufbauend eine semantiktragende nachrichtenbasierte Kommunikation der Agenten zu ermöglichen. Die derartige Kommunikation der Agenten stellt eine grundlegende Voraussetzung zur Verknüpfungserstellung auf Basis einer domänenübergreifenden Wissensrepräsentation und -verarbeitung durch die autonomen Agenten dar.



# Literaturverzeichnis

- [ACDB<sup>+</sup>98] ANUMBA, C.J. ; CUTTING-DECELLE, A.F. ; BALDWIN, A.N. ; DUFAU, J. ; MOMMESSIN, M. ; BOUCLAGHEM, N.M.: Integration of Product and Process Models as a Keystone of Concurrent Engineering in Construction: the ProMICE Project. In: [Amo98]
- [Ada97] ADAMS, T. M. (Hrsg.): *Computing in Civil and Building Engineering Proceedings of the Fourth Congress*. American Society of Civil Engineers, June 1997
- [AG00] ANDERL, R. ; GRÄB, R.: Parametrik in der Integration von CAD-Systemen und mechatronischen Entwurfswerkzeugen. In: [Iwa00]
- [AGK<sup>+</sup>00] ANDERL, R. ; GAUSEMEIER, J. ; KESPOHL, H. D. ; CLAASSEN, E. ; AVENARIUS, J.: Integrationsplattform für die Entwicklung mechatronischer Sytseme. In: [Iwa00]
- [AH95] AMOR, R. W. ; HOSKING, J.: Mappings: The glue in an integrated system. In: [Sch95b]
- [AJ95] ANDERSEN, T. ; JACOBSEN, K.: Information processing in building design: Integration and modelling. In: [PW95b]
- [Amo97] AMOR, R. W.: *A Generalized Framework for the Design and Construction of Integrated Design Systems*, University of Auckland, Diss., 1997
- [Amo98] AMOR, R. (Hrsg.): *Product and process modelling in the building industry: Proceedings of ECPPM '98 - the 2nd European Conference*. Building Research Establishment Ltd. Watford UK., 1998
- [Arb01] ARBEITSKREISOBJEKTE: AKO - Schnittstelle Kopplung objektorientierter dynamischer Modellverwaltungssysteme. <http://www.uni-weimar.de/Bauing/iwv/forschung/ako/Titel/AKO-Spezifikation.pdf>, Oktober 2001. – Forschungsbericht

- [ARV98] AUGENBROE, G. ; ROMBOUTS, W. ; VERHOEF, M.: Product Data Technology in Integrated A/E/C Systems: Past, Present & Future. In: [Amo98]
- [Aug95] AUGENBROE, G.: An overview of the COMBINE project. In: [Sch95b]
- [Bac96] BACHMANN, U.: *Untersuchung zur Strukturierung einer Schnittstelle von CAD-Tools und dynamischen Modellverwaltungssystemen*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 1996
- [BBCR95] BERGMANN, A. ; BODE, T. ; CREMERS, A. B. ; REDDIG, W.: Integrating civil engineering applications with object-oriented database management systems. In: [PW95b]
- [Bee97] BEETZ, K.: O.P.E.N. Objectoriented Productdata Engineering Network. In: [HK97]
- [Beu97] BEUCKE, K.: *Schlussbericht zum Forschungsvorhaben DBV 188 „CAE-Bauwerksmodelle“*. Fraunhofer IRB Verlag, 1997. – Bau-forschung T2783
- [BFW01] BUBNER, A. ; FRIEDRICH, T. ; WILLENBACHER, H.: Concept for Computer Supported Collaboration of different Fields involved in the Building Process for the Design and Optimization of Steel Frame Structures. In: *Modern Building Materials, Structures and Techniques Abstracts Of the 7th International Conference*, Vilnius Gediminas Technical University, 2001
- [Böh01] BÖHLAU, H-D.: *Realisierung und Evaluierung eines Verknüpfungs-Management-Systems zur Verwaltung und Speicherung von notificationsorientierten Verknüpfungen zwischen Domänenmodellen im Bauplanungsprozeß*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 2001
- [Bij95] BIJNEN, A.: Operation mapping or how to get the right data? In: [Sch95b]
- [Bjö89] BJÖRK, B-C.: Basic structure of a proposed building product model. In: *Computer-Aided Design* 21 (1989), Nr. 2, S. 71–78
- [Bjö92] BJÖRK, B-C.: A conceptual model of spaces, space boundaries and enclosing structures. In: *Automation in Construction* 1 (1992), Nr. 3, S. 193–214

- [Bjö95] BJÖRK, B-C.: *Requirements and information structures for building product data models*. VTT Publications 245. VTT Technical Research Centre of Finland, 1995
- [BJS98] BEETZ, K. ; JUNGE, R. ; STEINMANN, R.: The O.P.E.N. Platform enabling virtual enterprises. In: [Amo98]
- [BKR<sup>+</sup>98] BÖHMS, M. ; KÖTHE, M. ; RANGES, J. ; STEINMANN, R. ; JUNGE, R. ; ZARLI, A.: Virtual Enterprise using Groupware tools and distributed Architectures. In: [Amo98]
- [Boo94] BOOCH, G.: *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1994
- [Bre98] BRETSCHNEIDER, D.: *Modellierung rechnerunterstützter, kooperativer Arbeit in der Tragwerksplanung*. VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 1998
- [BRJ99] BOOCH, G. ; RUMBAUGH, J. ; JACOBSEN, I.: *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison Wesley Longman, Inc., 1999
- [BT95] BAKKEREN, W. J. C. ; TOLMAN, F. P.: Integrating structural synthesis and evaluation using product models. In: [PW95b]
- [BZW98] BRENNER, W. ; ZARNEKOW, R. ; WITTIG, H.: *Intelligente Softwareagenten Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [CH98] CAGLAYAN, A. K. ; HARRISON, C. G.: *Intelligente Software-Agenten Grundlagen, Technik und praktische Anwendung im Unternehmen*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
- [DFVA95] DUBOIS, A.M. ; FLYNN, J. ; VERHOEF, M.H.G. ; AUGENBROE, G.L.M.: Conceptual modelling approaches in the COMBINE project. In: [Sch95b]
- [DMBB98] DEBRAS, Ph. ; MONCEYRON, J. ; BAUER, F. ; BALLESTA, Ph.: An Information Server for the Building Industry : Interest of a STEP/IFC Based Approach. In: [Amo98]
- [Dom01a] DOMRÖS, C.: *Untersuchung und Erprobung möglicher Verfahren und Methoden zur Agentenkommunikation im Kontext eines agentenbasierten Modellverwaltungssystems*. Januar 2001. – Studienarbeit

- [Dom01b] DOMRÖS, C.: *XSLT als Basis der Kohärenzabbildung in Bauwerksmodellen*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 2001
- [DP97] DONATH, D. ; PETZOLD, F.: *From Digital Building Surveying to an Information System* Vienna University of Technology, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 1997
- [Dro90] DROSDOWSKI, G. (Hrsg.): *Duden Fremdwörterbuch*. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 1990
- [Eas99] EASTMAN, C. M.: *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*. CRC Press LLC, 1999
- [EJCJ97] EASTMAN, C. ; JENG, T. S. ; CHOWDBURY, R. ; JACOBSEN, K.: Integration of Design Applications with Building Models. In: [Jun97]
- [FAA<sup>+</sup>98] FARAJ, I. ; ALSHAWI, M. ; AOUAD, G. ; CHILD, T. ; UNDERWOOD, L.: The Implementation of the IFC in a Distributed Computer Integrated Environment. In: [Amo98]
- [Fed93] FEDERAL INFORMATION PROCESSING STANDARDS PUBLICATION 184: INTEGRATION DEFINITION FOR INFORMATION MODELING (IDEF1X) / National Institute of Standards and Technology. <http://www.idef.com/Downloads/pdf/Idef1x.pdf>, Dezember 1993. – Forschungsbericht
- [Fer99] FERBER, J.: *Multi-Agent Systems An Introduction to distributed artificial intelligence*. ADDISON-WESLEY, 1999
- [FFH<sup>+</sup>94] FENVES, S. ; FLEMMING, U. ; HENDRICKSON, C. ; MAHER, M. L. ; QUADREL, R. ; TERK, M. ; WOODBURY, R.: *Concurrent Computer-Integrated Building Design*. PTR Prentice-Hall, Inc., 1994
- [FIP01] Agent Communication Language Specifications / The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). <http://www.fipa.org/repository/aclspecs.html> - Oktober 2001, Oktober 2001. – Forschungsbericht
- [Fir01] FIRMENICH, B.: *CAD im Bauplanungsprozess: Verteilte Bearbeitung einer strukturierten Menge von Objektversionen*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 2001
- [FLL95] FISCHER, M.A. (Hrsg.) ; LAW, K.H. (Hrsg.) ; LUITEN, B. (Hrsg.) ; Stanford University (Veranst.): *CIB Workshop on Computers and Information in Construction, W78 and TC10, Modeling of Buildings Through their Life-cycle*. 1995

- [FM97] FORGBER, U. ; MÜLLER, C.: A Planning Process Model for Computer Supported Cooperative Work in Building Construction. In: [Hem97]
- [For99] FORGBER, U.: *Die Vernetzung von Kompetenzdomänen in virtuellen Projektträumen*, Fakultät für Architektur der Universität Karlsruhe (TH), Diss., 1999
- [FPR00] FRUCHTER, R. (Hrsg.) ; PEÑA-MORA, F. (Hrsg.) ; RODDIS, W.M. K. (Hrsg.): *Proceedings of the Eighth International Conference Computing in Civil and Building Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2000
- [FS97] FOWLER, M. ; SCOTT, K.: *UML Distilled applying the standard object modelling language*. Addison Wesley Longman, Inc., 1997
- [FW93] FLEMMING, U. (Hrsg.) ; WYK, S. V. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*. Elsevier Science Publishers B.V., 1993
- [FY00] FROESE, T. M. ; YU, K.: Architecture Issues For Distributed AEC/FM Systems. In: [FPR00]
- [Gal95] GALLE, P.: Towards integrated, „intelligent“, and compliant computer modeling of buildings. In: *Automation in Construction* 4 (1995), S. 189–211
- [GGK99] GAUSEMEIER, J. ; GRASMAN, M. ; KESPOHL, H.D.: Verfahren zur Integration von Gestaltungs- und Berechnungssystemen. In: *Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung* VDI-Gesellschaft, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 1999
- [Gie88] GIELINGH, W.: General AEC Reference Model (GARM) / ISO TC184/SC4/WG1 doc. 3.2.2.1, TNO Report BI-88-150, Delft. 1988. – Forschungsbericht
- [GKP<sup>+</sup>97] GROSCHKE, A. ; KLOSE, D. ; PYKA, R. ; THIERFELDER, J. ; WESSOLLEK, J. ; WILLENBACHER, H.: Ein praxisorientiertes Integrationskonzept für den Komplettbau. In: [HK97]
- [Gra94] GRAHAM, I.: *Object Oriented Methods*. second edition. Addison-Wesley Publishing Company, 1994
- [Gra01] Grasshopper 2 the Agent Plattform / IKV++ Technologies AG. <http://www.grasshopper.de/>, Oktober 2001. – Forschungsbericht

- [GSS98] GROSCHKE, A. (Hrsg.) ; SCHNEIDER, U. (Hrsg.) ; SCHUMANN, R. (Hrsg.): *10. Forum Bauinformatik Junge Wissenschaftler forschen*. VDI Verlag GmbH, 1998
- [GTKB00] GIL, N. ; TOMMELEIN, D. I. ; KIRKENDALL, B. ; BALLARD, D.: Lean Product-Process Development Process to support Contractor Involvement during Design. In: [FPR00]
- [Hal94] HALLER, H-W.: *Ein Produktmodell für den Stahlbau*, Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Diss., 1994
- [Har00] HARTMANN, D. (Hrsg.): *Objektorientierte Modellierung in Planung und Konstruktion*. Wiley-VCH GmbH, 2000. – Deutsche Forschungsgemeinschaft
- [Hei01] HEINSSMANN, M.: *Untersuchungen zur Spezifikation und Realisierung von Interoperabilitätskonzepten (hauptsächlich CORBA-basierter) Multiagentensysteme zur Schaffung eines effizienten Daten- und Informationsaustausches*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 2001
- [Hem94] HEMPEL, L. (Hrsg.): *Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen*. 1994
- [Hem97] HEMPEL, L. (Hrsg.): *Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen - IKM*. 1997
- [Hem00] HEMPEL, L. (Hrsg.): *International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Civil Engineering*. Weimar, 2000
- [HFV00] HASSANAIN, M. A. ; FROESE, T. M. ; VANIER, D. J.: IFC-based Data Model for Integrated Maintenance Management. In: [FPR00]
- [HH97] HAUSCHILD, T. ; HÜBLER, R.: Entwicklung eines verteilbaren und kooperativ nutzbaren objektorientierten CAAD-Produktmodellierkerns. In: [Hem97]
- [HH99] HOVESTADT, V. ; HOVESTADT, L.: The ARMILLA project. In: *Automation in Construction* 8 (1999), Februar, Nr. 3, S. 325–337
- [HH00] HAUSCHILD, T. ; HÜBLER, R.: Teamwork Support for Building Design Based on Dynamic Modeling Systems. In: [FPR00]

- [HHS99] HAUSCHILD, T. ; HÜBLER, R. ; SCHLEINITZ, M.: Realisierung rollenspezifischer Präsentationstypen von Bauwerksmodellinformationen im Groupplan-System. In: [KK99]
- [HHS00] HAUSCHILD, T. ; HÜBLER, R. ; SCHLEINITZ, M.: Unterstützung von Gruppenarbeit im Bauwerksentwurf auf der Basis eines dynamischen Bauwerks-Modelliersystems. In: [Iwa00]
- [HK97] HAUSER, M. (Hrsg.) ; KATRANUSCHKOV, P. (Hrsg.): *9. Forum Bauinformatik*. VDI Verlag GmbH, 1997
- [HKOS96] HALLER, H.-W. ; KNIERIM, D. ; OSTERRIEDER, P. ; SAAL, H.: Standardbeschreibung Produktschnittstelle Stahlbau / Deutscher Stahlbau-Verband. 1996. – Forschungsbericht
- [HKRS00] HANFF, J. (Hrsg.) ; KASPAREK, E. (Hrsg.) ; RUESS, M. (Hrsg.) ; SCHUTTE, G. (Hrsg.): *Forum Bauinformatik 2000*. VDI Verlag GmbH, 2000
- [HKS94] HÜBLER, R. ; KOLBE, P. ; STEINMANN, F.: Wissensbasierte Computerstützung früher Phasen des architektonischen Entwurfs Teil1 - Konzeption und Realisierung des Systems PREPLAN. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität - 4* (1994), S. 75–82
- [HKT95] HANNUS, M. ; KARSTILA, K. ; TARANDI, V.: Requirements on standardised building product data models. In: [Sch95b]
- [HOS95] HALLER, H.-W. ; OSTERRIEDER, P. ; SAAL, H.: Product models for structural steelwork. In: [PW95a]
- [Hov93] HOVESTADT, L.: A4 Digital Building: Extensive Computer Support for Building Design, Construction, and Management. In: [FW93]
- [HS95] HÜBLER, R. ; STEINMANN, F.: Knowledge-based computer assistance for functionality and shape oriented building design. In: [PW95a]
- [HS99] HUHNS, M. N. ; STEPHENS, L. M.: *Multiagent Systems and Societies of Agents*. In: [Wei99]. 1999, S. 79–120
- [Huh00a] HUHN, W.: Consistent Information Models for Controlling Technic and Economical Processes. In: [FPR00]
- [Huh00b] HUHN, W.: Modellierung der Prozesse als Basis der Informationssysteme für Bauunternehmen. In: [Hem00]

- [Iwa00] IWAINSKY, A. (Hrsg.) ; GFaI IIEF (Veranst.): *CAD 2000 Kommunikation Kooperation Koordination*. GI Gesellschaft für Informatik e.V., Bonn, März 2000
- [JAD01] JADE (Java Agent DEvelopment Framework) / CSELT - Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A. <http://sharon.cselt.it/projects/jade/>, Oktober 2001. – Forschungsbericht
- [JKS<sup>+</sup>97] JUNGE, R. ; KÖTHE, M. ; SCHULZ, K. ; ZARLI, A. ; BAKKEREN, W.: The VEGA Plattform. In: [Jun97]
- [JL95] JUNGE, R. ; LIEBICH, T.: New Generation CAD in an Integrated Design Environment: a Path towards Multi-Agent Collaboration. In: [TT95]
- [JL97] JUNGE, R. ; LIEBICH, T.: Product Data Model for Interoperability in an distributed Environment. In: [Jun97]
- [JL98] JUNGE, R. ; LIEBICH, T.: Product Modelling Technology - the Foundation of Industry Foundation Classes. In: [Amo98]
- [JLA95a] JUNGE, R. ; LIEBICH, T. ; AMMERMAN, E.: Product modelling for application. In: [Sch95b]
- [JLA95b] JUNGE, R. ; LIEBICH, T. ; AMMERMAN, E.: Product modelling for communication: The COMBI approach. In: [PW95b]
- [Jun97] JUNGE, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*. Kluwer Academic Publishers, 1997
- [JW98] JENNINGS, N. R. (Hrsg.) ; WOOLDRIDGE, M. J. (Hrsg.): *Agent Technology Foundations, Applications, and Markets*. UNICOM Seminars Ltd/Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [Kah95] KAHLEN, H.: Bauwirtschaft und umfassendes Facility Management. In: *BAUINFORMATIK* (1995), November/Dezember, Nr. 6
- [Kat95] KATRANUSCHKOV, P.: COMBI: Integrated product model. In: [Sch95b]
- [KB95] KOHLER, N. ; BEDELL, J. R.: Building product model for life cycle applications. In: [Sch95b]
- [KBHH97] KOHLER, N. ; BARTH, B. ; HEITZ, S. ; HERMANN, M.: Life Cycle Models of Buildings - A New Approach. In: [Jun97]



- [KFH00] KHANZODE, A. ; FISCHER, M. ; HAMBURG, S.: Effects of Information Standards on the Design-Construction Interface: Case Examples from Steel Industry. In: [FPR00]
- [KH98] KATRANUSCHKOV, P. ; HYVÄRINEN, J.: Product Data Server for Concurrent Engineering in A/E/C. In: [Amo98]
- [Khe95a] KHEDRO, T.: AgentCAD for Cooperative Design. In: [TT95]
- [Khe95b] KHEDRO, T.: Facility design and construction through cooperative network information communications. In: [PW95a]
- [Khe96] KHEDRO, T.: A distributed problem-solving approach to collaborative facility engineering. In: *Advances in Engineering Software* (1996), Nr. 25, S. 243–252
- [KK97] KHEMLANI, L. ; KALAY, Y. E.: An Integrated Computing environment For Collaborative, Multi-Disciplinary Building Design. In: [Jun97]
- [KK99] KUHN, T. (Hrsg.) ; KATZ, H. (Hrsg.): *11. Forum Bauinformatik*. VDI Verlag GmbH, 1999
- [Klu99] KLUSCH, M. (Hrsg.): *Intelligent Information Agents Agent-Based Information Discovery and Management on the Internet*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- [Kol98] KOLBE, P.: AKO-Arbeitskreis Objekte Eine Schnittstelle für Modellverwaltungssysteme. In: [GSS98]
- [Kow97] KOWALCZYK, W.: *Ein interaktiver Modellierer für evolutionäre Produktmodelle*, Technische Universität München, Diss., 1997
- [KPP97a] KOLBE, P. ; PFENNIGSCHMIDT, S. ; PAHL, P. J.: Integration von Datenmodellen - Eine Technologie für das Facility Management. In: [Hem97]
- [KPP97b] KOLBE, P. ; PFENNIGSCHMIDT, S. ; PAHL, P. J.: Verteiltes Management in Telekommunikationsnetzen / Technische Universität Berlin Institut für Bauingenieurwesen. 1997. – Forschungsbericht
- [KQM93] DRAFT Specification of the KQML Agent-Communication Language / DARPA Knowledge Sharing Effort. <http://www.csee.umbc.edu/kqml/> - Oktober 2001, 1993. – Forschungsbericht

- [Kre94] KRETZSCHMAR U.A.: *Computergestützte Bauplanung*. Verlag für das Bauwesen GmbH, Berlin, 1994
- [KRS97] KOLBE, P. ; RANGLACK, D. ; STEINMANN, F.: Eine Schnittstelle für dynamische Objektstrukturen für Entwurfsanwendungen. In: [Hem97]
- [Lüc96] VAN LÜCK, H.: *Entwicklung generischer Muster für die Systemarchitektur integrierter Programmsysteme im Bauwesen*, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Diss., 1996
- [LMSH95] LOCKEMANN, P. C. ; MÜLLE, J. ; STURM, R. ; HOVESTADT, V.: Modeling and integrating design data from experts in a CAAD-environment. In: [Sch95b]
- [LW98] LIEBICH, T. ; WIX, J.: Highlights of the Development Process of Industry Foundation Classes. In: [Amo98]
- [MB95] MÜLLER, C. ; BOCK, T.: DISYC - Distributed Intelligent Information System in Construction. In: [PW95a]
- [Mül97] MÜLLER, C.: An Advanced Groupware Approach for an Integrated Planning Process in Building Construction. In: [Jun97]
- [Mül99] MÜLLER, C.: *Der Virtuelle Projektraum*, Fakultät für Architektur der Universität Karlsruhe (TH), Diss., 1999
- [MO92] MARTIN, J. ; ODELL, J. J.: *Object-Oriented Analysis and Design*. Prentice Hall Inc., 1992
- [MPR95] MEISSNER, U. ; PETERS, F. ; RÜPPEL, U.: Graphically interactive, object-oriented product modeling of structures. In: [PW95b]
- [MR94] MEISSNER, U. ; RÜPPEL, U.: Objektorientierte Integration von Prozessen in der Tragwerksplanung. In: [Hem94]
- [MZ95] MOWBRAY, T. J. ; ZAHAVI, R.: *The Essential CORBA Systems Integration Using Distributed Objects*. John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [NBL93] VAN NEDERVEEN, S. ; BAKKEREN, W. ; LUITEN, B.: Information Models for Integrated Design. In: [FW93]
- [NLE00] NITZ, S. ; LIEBICH, T. ; EMMERICH, F.: Industrial Foundation Classes im Bereich des Computer-Aided Facility Management. In: [Iwa00]

- [Obe97] OBERMEYER, L.: Integrierte Planung - Im Dialog zwischen Mensch und Maschine. In: [HK97]
- [Ol98] OLBRICHT, M.: *Relationenorientiertes Modellieren mit Objekten in der Bauinformatik*, Universität Hannover - Institut für Bauinformatik, Diss., 1998
- [Pet00] PETZOLD, F.: *Computergestützte Bauaufnahme als Grundlage für die Planung im Bestand - Untersuchungen zur digitalen Erfassung und Modellbildung*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Architektur, Diss., 2000
- [Pfe98] PFENNIGSCHMIDT, S.: Schema-Mapping auf der Grundlage eines gemeinsamen Konzept-Modells. In: [GSS98]
- [Pol96] POLLY, A.: *Methodische Entwicklung und Integration von Produktmodellen*. Bd. 4. Shaker Verlag, 1996
- [Poy95] POYET, P.: ATLAS integration tools. In: [Sch95b]
- [PW95a] PAHL, P. J. (Hrsg.) ; WERNER, H. (Hrsg.): *Computing in Civil and Building Engineering*. Balkema Rotterdam, 1995
- [PW95b] PAHL, P. J. (Hrsg.) ; WERNER, H. (Hrsg.): *Proceedings of the sixth international Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, 1995
- [RF00] REINER, K. ; FRUCHTER, R.: Project Memory Capture in Globally Distributed Facility Design. In: [FPR00]
- [RJB99] RUMBAUGH, J. ; JACOBSEN, I. ; BOOCH, G.: *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison Wesley Longman, Inc., 1999
- [RM00] RÜPPEL, U. ; MEISSNER, U. F.: Co-operative Structural Engineering in Distributed Systems. In: [FPR00]
- [Rüp93] RÜPPEL, U.: *Objektorientiertes Management von Produktmodellen der Tragwerksplanung*, Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Darmstadt, Diss., 1993
- [RS01] ROMBERG, R. (Hrsg.) ; SCHULZ, M. (Hrsg.): *Forum Bauinformatik 2001*. VDI Verlag GmbH, 2001
- [SAB<sup>+</sup>00] SUN, M. ; AOUAD, G. ; BKIS, N. ; BIRCHALL, S. ; SWAN, W.: Integrated Information Management and Exchange for Water Treatment Projects. In: [FPR00]

- [SBK<sup>+</sup>98] STEPHENS, J. ; BÖHMS, M. ; KÖTHE, M. ; RANGES, J. ; STEINMANN, R. ; JUNGE, R. ; ZARLI, A.: Virtual Enterprise using Groupware tools and distributed Architectures. In: [Amo98]
- [SC00] SOIBELMANN, L. ; CALDAS, C.: Information Logistics for Construction Design Team Collaboration. In: [FPR00]
- [Sch95a] SCHERER, R. J.: EU-project COMBI - Objectives and overview. [Sch95b],
- [Sch95b] SCHERER, R. J. (Hrsg.): *Product and Process Modelling in the Building Industry: Proceedings of ECPPM '95 - The First European Conference*. A.A.Balkema / Rotterdam / Brookfield, 1995
- [Sch98] SCHERER, R. J.: A Framework for the Concurrent Engineering Environment. In: [Amo98]
- [Sch00] SCHNEIDER, U.: *Standardisierung der Kommunikation als Integrationsansatz für das Bauwesen*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 2000
- [SDSZ97] STEIGER, F. ; DÖRR-LINTL, A. ; SCHACHL, Ch. ; ZIMMERMANN, F.: Das „Virtuelle Büro“ - Eine Antwort auf den Strukturwandel im Bauwesen. In: *Beratende Ingenieure* (1997), Mai, S. 17–23
- [SH97] STEINMANN, F. ; HÜBLER, R.: Vorgehensmodelle als Basis der Gestaltung durchgängiger CAD-Systeme. In: [Hem97]
- [Sie96] SIEGEL, J.: *CORBA Fundamentals and Programming*. John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [SLM01] SCHIPPER, A. ; LEUSINK, M. ; VAN MONTFRANS, M.: Nijssen's Information Analysis Method / Method Engineering Encyclopaedia. <http://panoramix.univ-paris1.fr/CRINFO/dmrg/MEE97/misop032/>, Juni 2001. – Forschungsbericht
- [SP98] SUN, M. ; PARAND, F.: Integration of CAD, Product Model and Distributed Building Component Databases. In: [Amo98]
- [SS95] SOLEY, R. M. (Hrsg.) ; STONE, C. M. (Hrsg.): *Object Management Architecture Guide*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [Ste94] STEINMANN, F.: Wissensbasierte Computerstützung früherer Phasen des architektonischen Entwurfs Teil1 - Wissensorganisation und Unschärfe im System PREPLAN. 4 (1994), S. 83–97

- [Ste97] STEINMANN, F.: *Modellbildung und computergestütztes Modellieren in frühen Phasen des architektonischen Entwurfes*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 1997
- [TF94] TEICHOLZ, P. ; FISCHER, M.: Strategy for Computer Integrated Construction Technology. In: *Journal of Construction Engineering and management* 120 (1994), März, Nr. 1, S. 117–129
- [TGW97] THIERFELDER, J. ; GROSCHE, A. ; WILLENBACHER, H.: Produktmodellierung im Komplettbau - Abschlußbericht / Bauhaus-Universität Weimar. 1997. – Forschungsbericht
- [The01] THEISS, M.: Entwicklung eines agentenbasierten Modellverbundes zur kooperativen Gebäudeplanung. In: [RS01]
- [TP95] TOLMAN, F. ; POYET, P.: The ATLAS models. In: [Sch95b]
- [TT95] TAN, M. (Hrsg.) ; TEH, R. (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer-aided Architectural Design Futures*. Centre for Advanced Studies in Architecture, National University of Singapore, 1995
- [TT99] THUROW, T. ; TSCHEREPANOW, R.: *Konzeption eines flexiblen, bauteilorientierten, tachymetrischen Aufmaßsystems*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Architektur, Diplomarbeit, 1999
- [Tur90] TURNER, J.: AEC Building System Model / ISO TC184/SC4/WG1 doc. 363. 1990. – Forschungsbericht
- [TWWG97] THIERFELDER, J. ; WESSOLLEK, J. ; WILLENBACHER, H. ; GROSCHE, A.: Problems with Using a Typified Interface in Structural Steel Engineering. In: [Ada97]
- [UANT00] UGWU, O.O. ; ANUMBA, C.J. ; NEWNHAM, L. ; THORPE, A.: Agent-oriented collaborative design of industrial buildings. In: [FPR00]
- [Vet95] VETTER, M.: *Objektmodellierung*. B.G. Teubner Stuttgart, 1995
- [VLA95] VERHOEF, M. ; LIEBICH, T. ; ARMOR, R.: A Multi-Paradigm Mapping Method Survey. In: [FLL95]
- [Was97] WASMER, A. M.: *Methodische Vorgehensweise beim Entwurf von Mappings zwischen Produktmodellen*, Universität Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1997
- [Was98] WASSERFUHR, R.: Shared Process Models for Distributed Cooperative Engineering. In: [Amo98]

- [WBFW01] WERNER, F. ; BUBNER, A. ; FRIEDRICH, T. ; WILLENBACHER, H. *Concept for collaboration in planning of steel structures*. First International Conference Steel & Composite Structures, Pusan (Korea). 2001
- [Weh95] WEHNER, R.: *Implementation eines Modellierkerns für lauffzeit-dynamische Objektstrukturen in CAD-Produktmodellen*, Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, 1995
- [Wei98] WEIMAR, Bauhaus-Universität: „*Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken*“ (SFB 1692). November 1998. – Antrag auf Einrichtung des Sonderforschungsbereiches an der Bauhaus-Universität
- [Wei99] WEISS, G. (Hrsg.): *Multiagent Systems A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1999
- [Wei01] WEIMAR, Bauhaus-Universität: *Sonderforschungsbereich 524*. November 2001. – Kolloquium zu den Ergebnissen der 1. Förderperiode 07'99-06'01
- [WH99] WILLENBACHER, H. ; HÜBLER, R.: Notification- und Securityservice als Bestandteil einer Schnittstelle für Modellverwaltungssysteme. In: [KK99]
- [WH00] WILLENBACHER, H. ; HÜBLER, R.: Beziehungen zwischen Partialmodellen - Ansatz zur Schaffung einer integrierenden computer-gestützten Planungsumgebung. In: [Hem00]
- [WHBD01] WILLENBACHER, H. ; HÜBLER, R. ; BÖHLAU, H.-D. ; DOMRÖS, Ch.: Agentenbasierte Bauwerksmodellverwaltung. In: [RS01]
- [WHBF01] WILLENBACHER, H. ; HÜBLER, R. ; BUBNER, A. ; FRIEDRICH, T.: Verknüpfungsbasierter Bauwerksmodellansatz. In: [RS01]
- [WJ95] WOOLDRIDGE, M. ; JENNINGS, N.: Intelligent Agents: Theory and Practice. In: *Knowledge Engineering Review* 10 (1995), June, Nr. 2
- [WK95] WERNER, H. ; KOWALCZYK, W.: Representation of product data models that evolve during the design process. In: [Sch95b]
- [WL98] WIX, J. ; LIEBICH, T.: Industry Foundation Classes Some Business Questions Examined. In: [Amo98]
- [Woo99] WOOLDRIDGE, M.: *Intelligent Agents*. In: [Wei99]. 1999, S. 27–78

- [WS97] WASSERFUHR, R. ; SCHERER, R. J.: Information Management in the Concurrent Design Process. In: [Hem97]
- [WS99] WIX, J. ; SEE, R. *An Introduction to the International Alliance for Interoperability and the Industry Foundation Classes Enabling Interoperability in the AEC/FM Industry*. IFC Release 2.0 / IFC Specifications Development Guide. März 1999
- [WSH97] WEHNER, R. ; STEINMANN, F. ; HÜBLER, R.: FLEXOB - Entwicklungstool für dynamische modellbasierte CAD-Systeme. In: [Hem97]
- [WWPB00] WILLENBACHER, S. ; WILLENBACHER, H. ; PETZOLD, F. ; BUBNER, A.: Relationenorientierter Daten- und Informationsaustausch - Basis eines flexiblen digitalen Bauwerksmodells. In: [HKRS00]
- [XML01] Extensible Markup Language (XML) / World Wide Web Consortium (W3C). <http://www.w3.org/XML/>, Oktober 2001. – Forschungsbericht
- [XSL01] XSL Transformations (XSLT) / World Wide Web Consortium (W3C). <http://www.w3.org/TR/xslt>, Oktober 2001. – Forschungsbericht